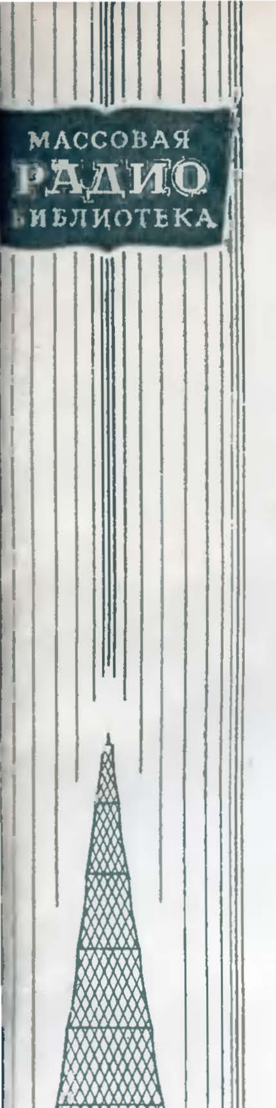
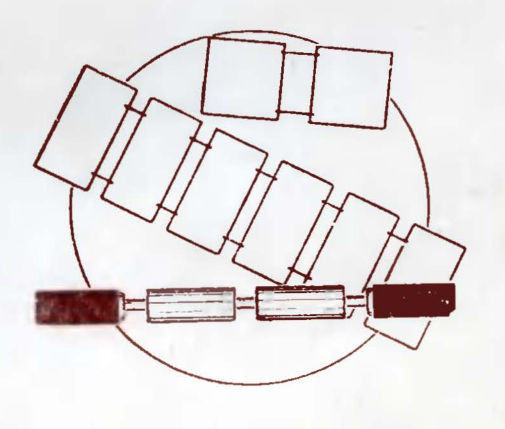


М. Г. ГОЛУБЦОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ РАДИОЧАСТОТ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1957

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 282

М. Г. ГОЛУБЦОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ РАДИОЧАСТОТ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1957 ЛЕНИНГРАД

В брошюре рассматриваются новые виды фильтров, применяемых в радиотехнических устройствах, обладающих частотной характеристикой, по форме близкой к прямоугольной.

Брошюра рассчитана на подготовленного радиолюбителя.

СОДЕРЖАНИЕ

Автор *Голубцов Михаил Георгиевич*

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ РАДИОЧАСТОТ

Редактор *П. О. Чечик* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 7/VIII 1957 г. Подписано к печати 19/X 1957 г. Т-07499.
Бумага 84×108¹/₃₂ 2,5 печ. л. Уч.-изд. л. 2,8.
Тираж 25 000 экз. Цена 1 р. 15 к. Заказ 431

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из средств улучшения качества работы радиоприемника является повышение его избирательности. Для этой цели все чаще вместо обычных полосовых фильтров, состоящих из двух связанных контуров, стали применять многозвенные полосовые фильтры. Такие фильтры позволяют получать хорошие частотные характеристики с большим рабочим затуханием в полосе непропускания и плоской вершиной в полосе пропускания.

Построить полосовой фильтр с частотной характеристикой, по форме приближающейся к прямоугольной, довольно трудно, так как добротность электрических контуров, входящих в фильтр, сравнительно низка (обычно не превышает несколько сотен), что мешает изготовить фильтр с очень крутыми фронтами и малым вносимым затуханием в полосе пропускания.

Другим обстоятельством, ограничивающим применение многозвенного полосового фильтра, являются его размеры. Дело в том, что для получения хорошей частотной характеристики необходимо большое число звеньев, а уменьшение размеров элементов фильтра, как правило, отрицательно сказывается на добротности его контуров и, следовательно, ухудшает его частотную характеристику.

Эти обстоятельства, видимо, послужили поводом к тому, что в последнее время радиоспециалисты обратили внимание на механические резонаторы. Добротность механических резонаторов велика, она измеряется тысячами, а на радиочастотах эти резонаторы обладают сравнительно малыми размерами. По своим свойствам механические резонаторы могут одновременно заменить и индуктивность и емкость обычного контура.

Принцип действия электромеханических фильтров основан на том, что высокочастотные электрические колебания

преобразуются в механические, которые пропускаются через фильтр, состоящий из ряда механических резонаторов. После фильтрации механические колебания вновь преобразуются в электрические, усиливаются и детектируются обычным способом. В качестве резонаторов применяются металлические стержни, шарики, диски и прямоугольные тонкие пластинки. Высокая добротность этих резонаторов позволила осуществить полосовые фильтры с очень крутыми склонами и плоской вершиной.

Электромеханические фильтры промежуточной частоты обеспечивают очень высокую избирательность радиоприемника. Коэффициент прямоугольности $K_{0,001}$ этих фильтров может быть доведен до величины

$$K_{0,001} = \frac{2\Delta f_{0,001}}{2\Delta f_{0,7}} = 1,5 \div 2,$$

где $2\Delta f_{0,7}$ — полоса пропускания фильтра на уровне 0,7, а $2\Delta f_{0,001}$ — полоса частот, соответствующая ослаблению помехи в 1 000 раз по напряжению. Эти фильтры строятся на частоты от десятков килогерц до 1 Мгц. В зависимости от средней частоты и выбранной схемы соединения элементов фильтра ширина полосы пропускания механических фильтров может быть установлена от десятков герц до десятков килогерц.

После изготовления и настройки электромеханического фильтра средняя частота и ширина его полосы остаются фиксированными, и изменение этих параметров осуществляется заменой одного фильтра другим.

Как уже указывалось, электромеханические фильтры на радиочастотах обладают малыми размерами, что выгодно отличает их от фильтров, собранных на обычных катушках индуктивности, и позволяет удачно сочетать их с печатным монтажом и миниатюрными деталями.

Для сравнения на рис. 1 приведены частотные характеристики некоторых электрических и механического фильтров.

Узкополосные механические фильтры применяются также для стабилизации частоты генераторов, для выделения опорной частоты, необходимой для работы автоподстройки при однополосном приеме, и в анализаторах спектра.

В настоящей брошюре кратко изложены физические основы теории колебаний механических тел, аналогия с электрическими колебаниями LC контуров и объяснение работы основных типов электромеханических полосовых фильтров.

Приведены также сведения о расчете, изготовлении и сборке механических фильтров в пределах, необходимых для самостоятельного изготовления этих фильтров радиолюбителями.

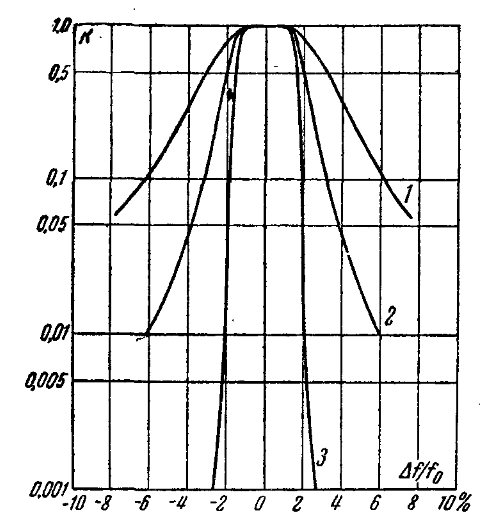


Рис. 1. Частотные характеристики фильтров.
1 — двухконтурного полосового фильтра; 2 — двух каскадов с двухконтурными полосовыми фильтрами; 3 — семиэлементного механического фильтра.

Ряд электромеханических фильтров исследовался в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР. В брошюре используются фотографии и частотные характеристики некоторых из этих фильтров.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

На радиочастотах нашли применение полосовые фильтры, состоящие из металлических круглых стержней. Чтобы познакомиться с работой этих фильтров, рассмотрим сначала колебания одного металлического стержня, изображенного на рис. 2, а. На радиочастотах используются продольные и крутильные колебания таких стержней. В случае продольных колебаний стержень то сжимается, то растягивается вдоль своей оси. При совпадении частоты внешней вынуждающей силы с собственной частотой колебаний стержня наступает резонанс, при котором периодические изменения длины стержня становятся максимальными. Соб-

ственная частота стержня с обоими свободными (или закрепленными) концами зависит от длины стержня l и от скорости распространения механических колебаний v_{np} вдоль его оси:

$$f_n = n \cdot \frac{v_{np}}{2l} = n \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{2l}, \qquad (1)$$

где n — номер гармоники, на которой наступает резонанс.

Скорость распространения механических колебаний можно выразить через объемную плотность материала стержня ρ и модуль упругости E, представляющий силу, которую нужно приложить к стержню с площадью поперечного сечения в 1 $см^2$ для того, чтобы удвоить его длину.

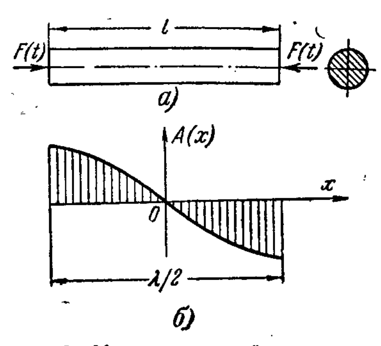


Рис. 2. Металлический резонатор в виде стержня круглого сечения
а — общий вид; *б* — изменение амплитуды колебаний в зависимостн от расстояния вдоль оси стержня от его середииы (длина стержня равна λ/2).

Самое низкое колебание совершается с частотой, равной $\frac{v_{np}}{2l}$. В этом случае длина стержня равна половине длины волны $\left(l = \frac{v_{np}}{2f_1} = \frac{\lambda}{2}\right)$, и если оба конца стержня не закреплены, то середина его является неподвижным местом или узлом, как показано на рис. 2.

В отличие от продольных колебаний крутильные колебания в стержне возникают на более низких частотах. Они также зависят от длины стержня l и от скорости распространения механических колебаний $v_{\kappa p}$. Однако крутильные колебания распространяются вдоль стержня медленнее и резонанс наступает на частотах

$$f_n = \frac{n \cdot v_{\kappa p}}{2l} = n \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{2 + 2\sigma}} \cdot \frac{1}{2l}, \qquad (2)$$

где n — номер гармоники, а σ — отношение Пуассона (отношение поперечного сжатия к продольному удлинению при растяжении стержня).

Для металлов $\sigma \approx {}^1/_3$. Интересно, что в формулу для собственной частоты (2) не входит диаметр d круглого

стержня. Если концы стержня свободны и длина его равна половине длины механической волны $\left(l = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{\kappa p}}{l} = \frac{1}{2}\lambda\right)$, то в середине стержня будет узел колебаний, а по концам — пучности.

На практике скручивание стержня всегда сопровождается изменением его длины. Следовательно, крутильные колебания сопровождаются продольными, и если крутильные колебания по частоте совпадают с собственной частотой продольных колебаний, то в стержне наблюдаются резонансные продольные колебания.

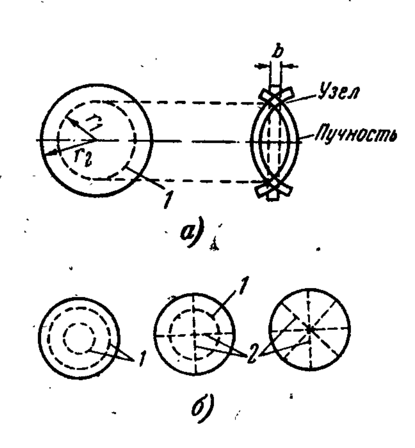


Рис. 3. Колебания изгиба металлических круглых пластинок.
а — форма колебаиий круглой пластинки (на изгнб) с одной узловой окружностью (*1* — узловая окружиость); *б* — различные виды колебаний круглых пластинок (*1* — узловые окружности, *2* — узловые диаметры).

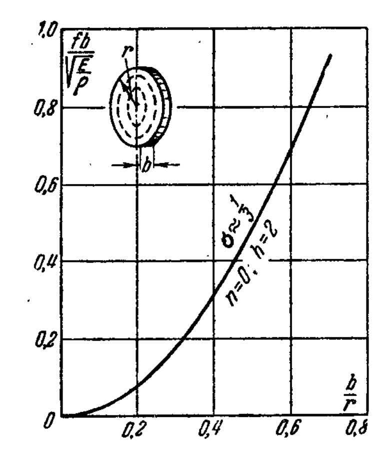


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты металлического диска от его размеров.

Среди других применяемых видов колебаний в механических фильтрах используются колебания изгиба металлических круглых пластинок. На рис. 3,*а* показана форма резонансного колебания свободной круглой пластинки, имеющего одну узловую окружность. Пунктирными линиями изображено сечение по диаметру пластинки, находящейся в покое, а толстыми линиями показаны два крайних положения круглой пластинки во время колебаний. Точки, лежащие на узловой окружности с радиусом r_1, остаются неподвижными. Из рис. 3,*б* видно, что некоторые типы колебаний, помимо узловых окружностей, могут иметь узловые диаметры. В этом случае центр пластинки не колеблется.

Во всех случаях колебаний только с узловыми окружностями имеет место смещение центра пластинки.

Различные типы колебаний круглой пластинки на изгиб возбуждаются на разных частотах, которые приближенно пропорциональны величине, равной $(n+2h)^2$, где n — число узловых диаметров, а h — число узловых окружностей.

На практике используются колебания круглых пластинок с двумя узловыми окружностями ($n=0$, $h=2$). Для этого случая на рис. 4 построена зависимость частоты f колебаний пластинки от отношения толщины пластинки b к ее радиусу r. Остальные типы колебаний относят к паразитным колебаниям, присутствующим на частотах, сравнительно близких к основной. При проектировании фильтров на круглых пластинках стремятся применить такой тип колебаний, чтобы частоты паразитных колебаний были отнесены, по возможности, дальше от основной частоты. Для этой цели надлежащим образом подбирают отношение толщины пластинки к ее радиусу.

На радиочастотах также нашли применение колебания растяжения тонких металлических пластинок с большим отношением b/L высоты к ширине (рис. 5,*а*). На рис. 5,*б* приведена зависимость резонансной частоты пластинки от отношения mb/L, где m — номер возбуждаемой гармоники, а $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ — скорость распространения продольных колебаний в стержне из материала пластинки. При выбранном номере гармоники резонансные колебания пластинки могут наблюдаться на двух частотах. Резонансные колебания, частоту которых можно найти по нижней или верхней кривой рис. 5,*б*, называются соответственно колебаниями первого и второго рода. На низких частотах используются колебания первого рода, причем размеры пластинок получаются небольшими. На высоких частотах применяются колебания второго рода. В этом случае механические фильтры имеют более прочную конструкцию.

На рис. 6 показана форма резонансного колебания пластины, имеющей отношение Пуассона $\sigma=0{,}31$ и различные отношения высоты к длине. Пунктирные линии показывают форму пластинки, находящейся в покое, а толстые линии — два крайних положения пластины во время колебаний. Если уменьшить отношение высоты пластинки к ее длине, то форма колебаний края пластинки будет иметь вид кривой с пиком в середине, когда это отношение станет очень малым (пластинка превратится в длинную тонкую полоску), форма колебаний края приблизится к прямой линии.

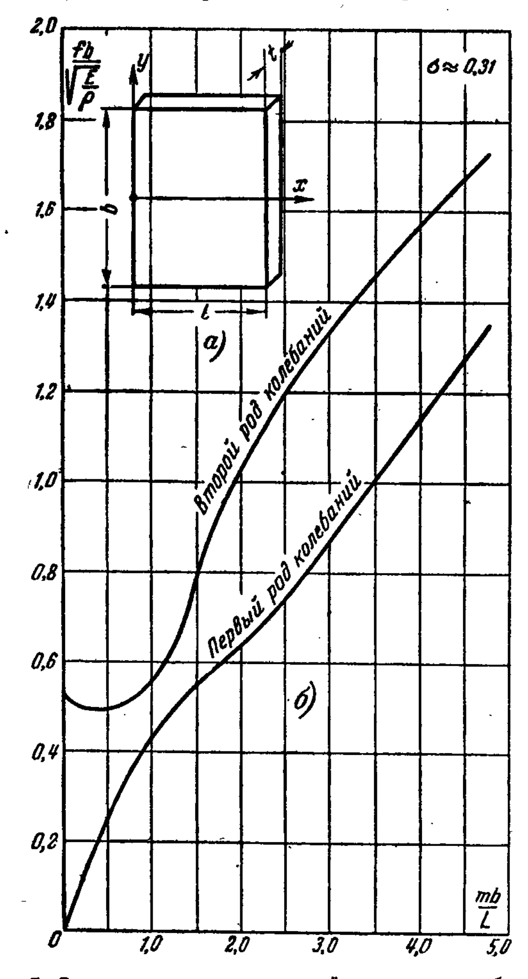


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты колебаний металлической пластинки от ее размеров.

а — общий вид пластинки; *б* — кривые для первого и второго рода колебаний пластинки.

Приведенные выше типы резонаторов имеют размеры, сравнимые с длиной волны механических колебаний. Поэтому резонаторы следует рассматривать как механические длинные линии с распределенными параметрами. Это осо-

бенно хорошо видно на примере стержневого резонатора (рис. 2). Процессы, происходящие в механической и электрической линиях, описываются аналогичными дифференциальными уравнениями. Из сравнения этих уравнений видно, что сила F, действующая в поперечном сечении стержня, соответствует напряжению между проводами электрической линии U; механическое демпфирование эквивалентно сопротивлению; масса эквивалентна индуктивности. Продольное смещение Δx поперечного слоя вдоль оси стержня анало-

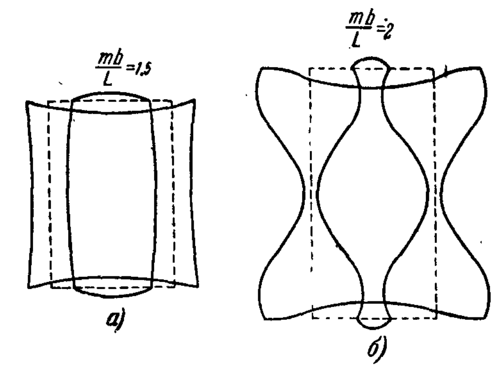


Рис. 6. Форма края металлической пластинки при колебаниях второго рода ($m = 1$).

а — для $\frac{mb}{L} = 1{,}5$; *б* — для $\frac{mb}{L} = 2$.

гично заряду q, протекающему по проводам электрической линии, а скорость смещения поперечного слоя вдоль продольной оси стержня аналогична току. Емкость $C=\frac{q}{U}$ аналогична $Э=\frac{\Delta x}{F}$ — эластичности материала.

Следовательно механические резонаторы можно заменить эквивалентными отрезками электрических длинных линий со своими характеристическими сопротивлениями. Если механические резонаторы возбуждаются на первой гармонике, то длина эквивалентной линии равна половине электрической волны (рис. 7,*а*). Вблизи от резонансной частоты f_n распределенные элементы линии заменяются сосредоточенными элементами. Анализ схемы замещения отрезка линии в половину длины волны показывает, что вблизи от частоты f_1 этот отрезок может быть представлен последовательным

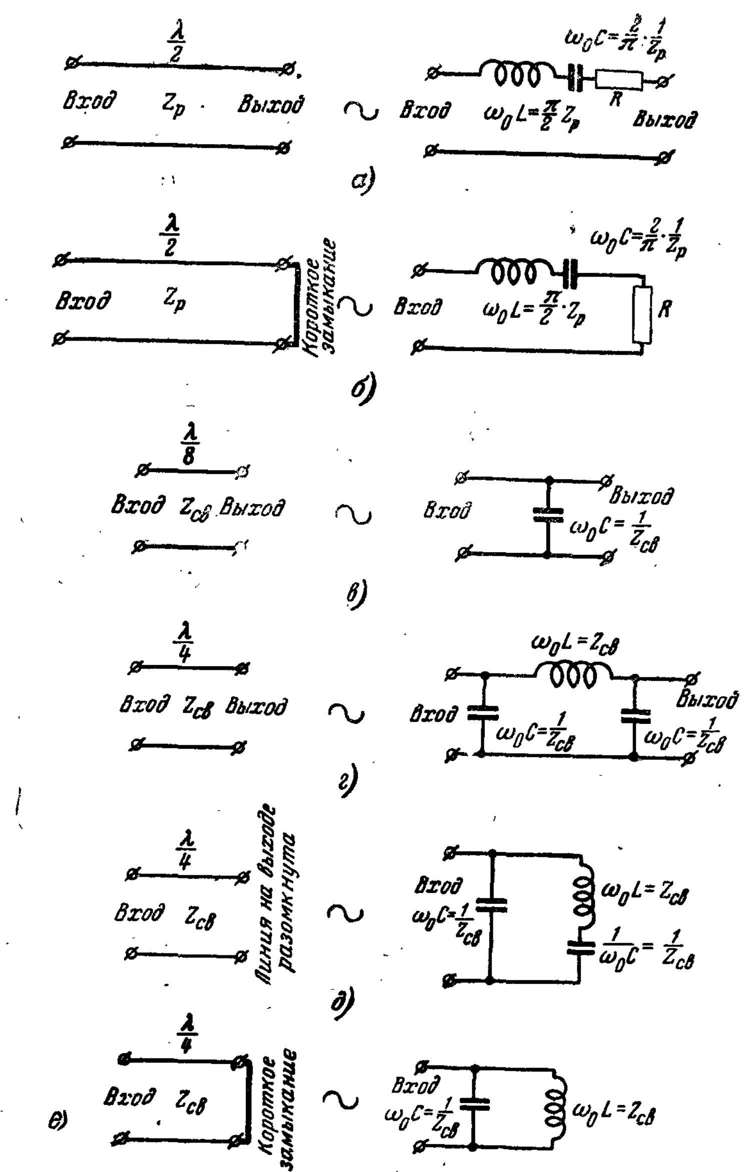


Рис. 7. Схемы замещения длинной линии четырехполюсником с сосредоточенными параметрами

а — эквивалент резонатора ($l = \lambda/2$) со свободными концами; *б* — эквивалент концевого резонатора ($l = \lambda/2$) с одним свободным концом; *в* — эквивалент связки ($l = \lambda/8$); *г* — схема замещения линии $\lambda/4$; *д* — эквивалент связки крепления $\lambda/4$; *е* — эквивалент концевой проволоки $\lambda/4$.

контуром, параметры которого зависят от характеристического сопротивления линии Z_p. Если конец стержня не закреплен, то это аналогично короткому замыканию соответствующих зажимов на эквивалентной электрической схеме, как показано на рис. 7,*б*. Это объясняется тем, что свободный конец стержня может колебаться с большой амплитудой, и большой скоростью, а как указывалось, скорость смещения поперечного слоя вдоль оси стержня пропорциональна току в электрической схеме. Поэтому большим скоростям смещения конца стержня соответствуют большие токи, которые возникают на короткозамкнутом конце линии. Помимо резонаторов, в состав механических фильтров входят связки, передающие механические колебания от одного резонатора к другому. Связки выполняются в виде тонких стержней длиной $\lambda/8$ и $\lambda/4$. Схемы замещения связок вблизи от средней частоты фильтра ω_0 приведены на рис. 7,*в* и *г*. В состав фильтра могут входить также четвертьволновые связки, применяемые для крепления фильтра к шасси. На схеме замещения они эквивалентны последовательному контуру, включенному на „землю" (рис. 7,*д*).

Для того чтобы возбудить в стержне механические колебания электрическим путем, используют либо пьезоэлектрический эффект, либо эффект магнитострикции. В электромеханических фильтрах промежуточной частоты особенно часто применяются магнитострикционные преобразователи, принцип действия которых основан на изменении формы и размеров ферромагнитных тел при их намагничивании. В качестве таких преобразователей обычно используют никель, или сплавы никеля с железом и другими металлами, или магнитострикционные ферриты.

При возбуждении магнитного поля вдоль стержня из магнитострикционного материала длина стержня изменяется. При увеличении длины стержня под воздействием магнитного поля имеет место так называемая положительная магнитострикция, а при уменьшении длины — отрицательная. Знак приращения длины стержня не зависит от направления магнитного поля, но зависит от состава ферромагнитного тела. Поэтому в стержне необходимо создавать дополнительное постоянное магнитное поле, чтобы колебания стержня не происходили с двойной частотой. Действие постоянного магнитного смещения показано на рис. 8. Величина смещения H_0 выбирается больше амплитуды переменного поля. При значительных напряженностях поля смещения наступает нелинейный режим и амплитуда механических

колебаний падает. Наряду со свойством прямой магнитострикции ферромагнитный стержень обладает свойством обратной магнитострикции, т. е. под действием внешней силы, изменяющей длину стержня, в нем возникает продольное магнитное поле.

Из рис. 9 видно, что относительное изменение длины никелевого стержня измеряется величинами порядка 10^{-5}.

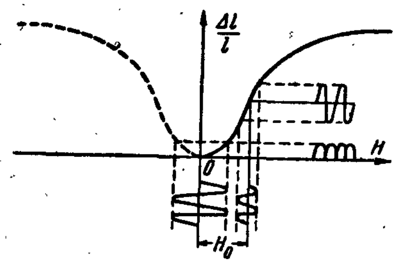


Рис. 8. Действие дополнительного постоянного магнитного поля на форму механических колебаний в магнитострикционном преобразователе.

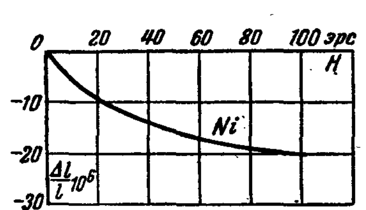


Рис. 9. Характеристика магнитострикции никеля.

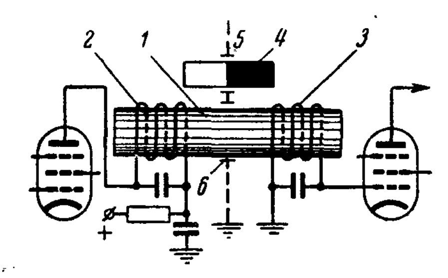


Рис. 10. Магнитострикционный фильтр.

1 — ферритовый стержень; *2* — возбуждающая катушка; *3* — катушка, снимающая колебания; *4* — постоянный магнит смещения; *5* — экран; *6* — крепление стержня.

Изменение длины стержня из никеля ослабевает при напряженности поля около 500 *эрс*. Начальный изгиб характеристики магнитострикции никеля занимает примерно 0,1—0,3 *эрс*. Магнитострикционными свойствами обладают также и некоторые сорта пермаллоя.

Если рядом со стержнем, выполненным из материала с сильно выраженными магнитострикционными свойствами, например из феррита, поместить магнит смещения и на концы стержня надеть возбуждающую катушку и катушку, снимающую колебания, то получим магнитострикционный фильтр (рис. 10).

Под воздействием переменного магнитного поля возбуждающей катушки стержень начинает периодически изменять свою длину. При совпадении частоты внешнего магнитного поля с собственной частотой стержня амплитуда механических колебаний резко возрастает. Здесь ферритовый стержень действует как механический резонатор с добротностью около 1 000. За счет обратной магнитострикции резонирующий стержень создает переменное магнитное поле во второй катушке, на зажимах которой возникает э. д. с., по частоте совпадающая с резонансной частотой стержня. Таким образом, в этом фильтре налицо следующие процессы: преобразование электрических колебаний в механические, механическая фильтрация и обратное преобразование механических колебаний в электрические. Колебания, пропускаемые фильтром за счет явления магнитострикции, настолько сильны, что влияние индуктивной связи между катушками фильтра ничтожно.

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ

На рис. 11,*а* показан механический фильтр, в котором процессы электромеханического преобразования и механической фильтрации происходят раздельно.

Ферритовые стержни на концах выполняют функции магнитострикционных преобразователей и избирательных элементов. Пять центральных резонаторов (больших цилиндров) и шесть соединяющих элементов (малых цилиндров) делаются из стали. Фильтрующее действие в основном оказывают высокодобротные металлические резонаторы. Концевые резонаторы фильтра вставлены в катушки — возбуждающую и снимающую колебания. Магнитное смещение в концевых резонаторах обеспечивается постоянными магнитами.

На рис. 11,*а* приведен случай, когда длина резонаторов фильтра равна половине длины механической волны $\lambda/2$, а длина связующих элементов равна $\lambda/8$. Размеры такого фильтра сравнимы с длиной волны, поэтому фильтр следует рассматривать как механическую длинную линию.

Каждый элемент механического фильтра можно заменить эквивалентным ему отрезком электрической длинной линии с распределенными параметрами, как показано на рис. 11,*б*. Вблизи от средней частоты фильтра распределенные элементы линии можно заменить сосредоточенными элементами (ср. рис. 7). Из рис. 11,*в* видно, что резонато-

рам соответствуют последовательные контуры L_pC_p, а связкам — емкости на „землю" $C_{св}$. Для согласования на концах фильтр имеет половинную индуктивность и двойную емкость, которые получаются при соответствующем выборе параметров ферритовых резонаторов. Необходимые нагрузки на кон-

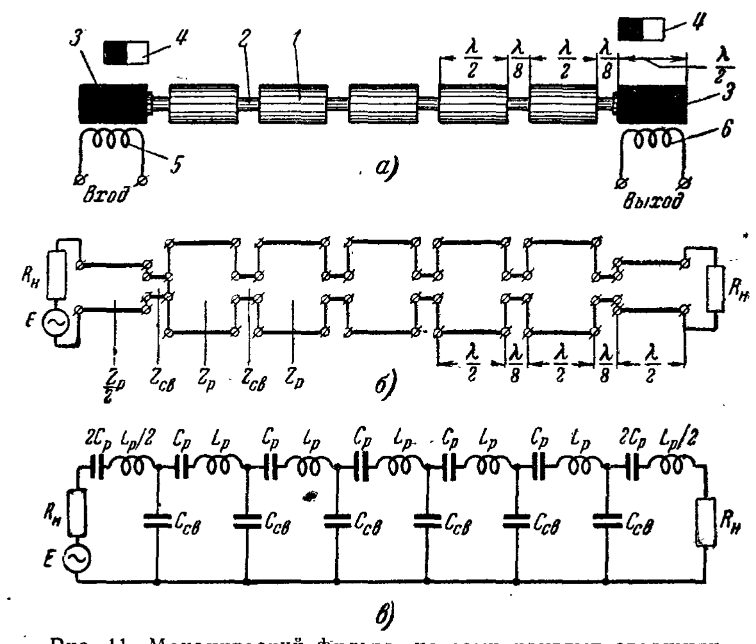


Рис. 11. Механический фильтр на семи круглых стержнях.

а — механическая схема фильтра (*1* — резонатор из стали, *2* — стальная точеная связка, *3* — магнитострикционный преобразователь из феррита, *4* — постоянный магнит смещения, *5* — возбуждающая катушка, *6* — катушка, снимающая колебания); *б* — схема, состоящая из отрезков длинных электрических линий, эквивалентных элементам механического фильтра; *в* — эквивалентная электрическая схема с сосредоточенными параметрами.

цах фильтра $R_н$ достигаются демпфированием концевых резонаторов.

Чем тоньше связки по сравнению с резонаторами, тем больше емкости $C_{св}$ на рис. 11,*в*; связь между контурами L_pC_p уменьшается, и полоса пропускания фильтра становится узкой.

В состав фильтра могут входить также резонаторы и связки длиной в четверть механической волны $\lambda/4$. Четвертьволновые связки улучшают частотную характеристику механического фильтра.

Для фильтров, действие которых основано на кручении, эквивалентные электрические схемы составляются таким же образом как и для фильтров, использующих продольные колебания стержней. Отличие составляет лишь конструкция магнитострикционных преобразователей, возбуждающих и снимающих колебания кручения.

На рис. 12 схематически показано устройство одного из таких преобразователей. Две проволоки длиной, кратной нечетному числу четвертей волны, присоединены к краям концевого резонатора. В проволоках возбуждаются противофазные продольные колебания. Когда одна проволока

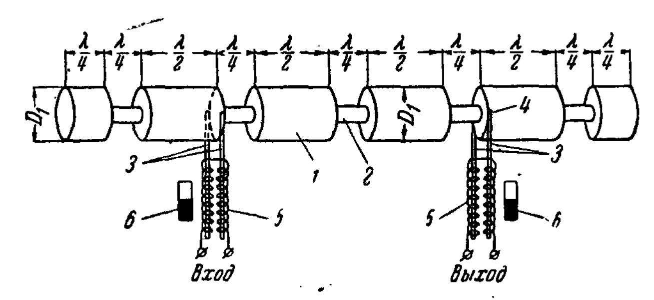


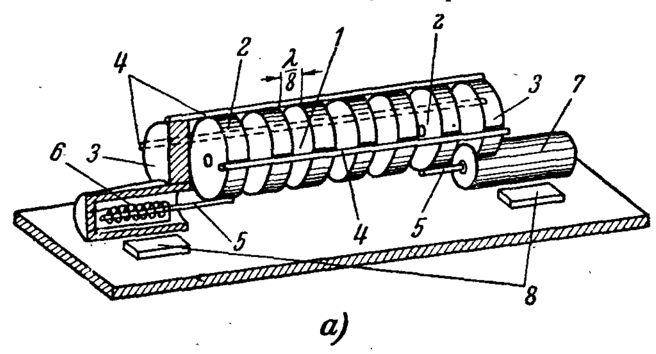
Рис. 12. Механическая схема фильтра, основанного на кручении

1 — резонатор; *2* — связка; *3* — магнитострикционные преобразователи; *4* — места прикрепления преобразователей к резонатору; *5* — возбуждающие катушки; *6* — магнит смещения.

сжимается по своей длине, другая — растягивается. В результате этого стержень, к которому присоединены проволоки, закручивается. Для увеличения амплитуды колебаний проволоки выполняются из сплава, обладающего высокими магнитострикционными свойствами (сплав, содержащий никель, железо, хром и титан). Из рис. 12 видно, что длина концевых резонаторов может быть равной $\lambda/4$, причем диаметры концевых и центральных резонаторов выбираются одинаковыми.

Существуют и другие конструкции механических фильтров, например такие, у которых вместо стержневых резонаторов используются отожженные стальные шарики (от шарикоподшипников). Шарики просверливаются и припаиваются к никелевой проволоке или к тонкостенной никелевой трубке, выполняющей роль магнитострикционного преобразователя и связок между шариками. Диаметр шарика должен приблизительно равняться четверти волны, а ширина полосы определяется площадью поперечного сечения связки.

На рис. 13 изображена механическая и эквивалентная электрическая схема фильтра, состоящего из шести металлических дисков. Магнитострикционные преобразователи в виде проволок из никеля или из специального магнитострикционного сплава имеют длину, кратную нечетному числу четвертей волны, и соответствуют двум параллельным контурам



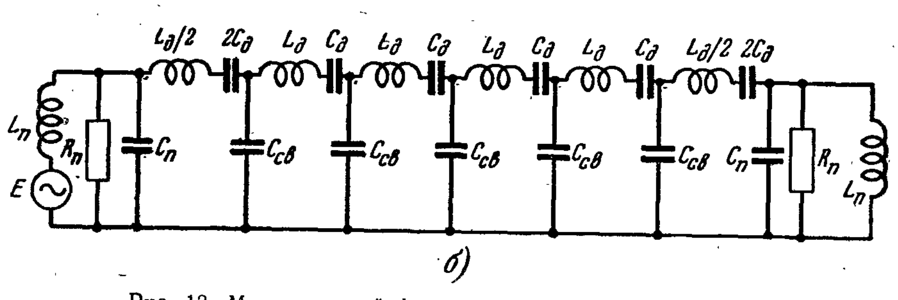


Рис. 13. Механический фильтр на шести круглых дисках.

а — механическая схема фильтра (*1* — металлическая круглая пластинка, *2* — концевые металлические пластинки, *3* — опорный диск, *4* — проволочные связи между дисками, *5* — магнитострикционные преобразователи из никелевой проволоки, *6* — возбуждающая катушка, *7* — латунный экран катушки, снимающей колебания, *8* — магниты смещения); *б* — эквивалентная электрическая схема с сосредоточенными параметрами.

$L_n C_n$, настроенным на резонансную частоту диска (рис. 7,*е*). Эквивалентная добротность этих контуров невелика, поэтому вблизи от средней частоты фильтра контуры $L_n C_n$ можно заменить их сопротивлением при резонансе.

Диски эквивалентны высокодобротным последовательным резонансным элементам $L_\partial C_\partial$. Они соединены между собой тремя проволоками связи длиной $^1/_8$ от длины механиче-

ской волны. Проволоки между дисками эквивалентны емкостям, включенным на „землю“. Изменяя толщину проволок связи, можно изменить полосу пропускания фильтра. В центре каждого из концевых дисков просверливается отверстие, диаметр которого должен быть настолько мал, чтобы не изменилась резонансная частота концевого диска. Отверстие в центре уменьшает полное сопротивление механического диска вполовину, что аналогично уменьшению вполовину эквивалентной индуктивности и удвоению эквивалентной емкости концевого диска. Помимо этого, отверстия в центре концевых дисков уменьшают амплитуду паразитных колебаний, соседних с частотой используемого вида колебаний. За концевыми настроенными дисками следуют крепежные ненастроенные диски по одному с каждой стороны, при помощи которых полосовая система соединяется с латунными трубками, в которых заключены возбуждающая и снимающая колебания катушки. Связь между настроенными и ненастроенными дисками осуществляется при помощи проволок длиной $\lambda/4$. Постоянные магниты крепятся вне латунных экранов катушек. Катушки настраивают в резонанс и включают непосредственно в цепи анода и сетки ламп.

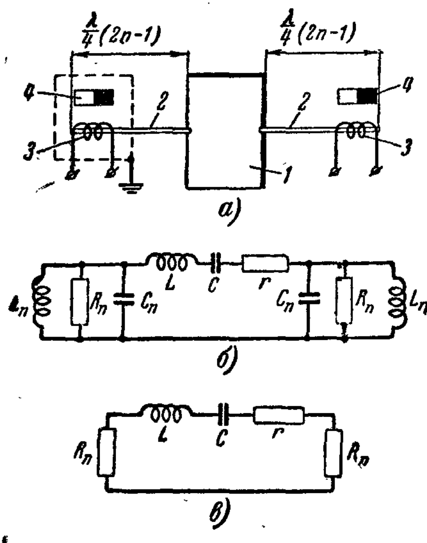


Рис. 14. Узкополосный фильтр на одной пластинке.

а — механическая схема (*1* — пластинка из высокодобротного материала, *2* — никелевые проволоки, *3* — катушки снимающая и возбуждающая колебания, *4* — магниты смещения); *б* и *в* — эквивалентные электрические схемы.

Схема, изображенная на рис. 14, применяется для определения резонансной частоты пластинки, а также в качестве узкополосного механического фильтра. В узлы колебаний пластинки (ср. рис. 6) присоединены возбуждающая и снимающая колебания никелевые проволоки. Длина проволок равна нечетному числу четвертей волны. На эквивалентной схеме проволокам соответствуют контуры $L_n C_n$. Контур $L_p C_p$ соответствует пластинке. Полоса пропускания

оконечных проволок значительно шире полосы пропускания пластинки, поэтому в полосе пропускания фильтра параллельные контуры можно заменить их сопротивлениями при резонансе R_n. Полосу пропускания фильтра можно определить по формуле

$$Q_э = \frac{f_p}{2\Delta f_{0,7}} = \frac{2\pi f_p L_p}{r_p + 2R_n}. \qquad (3)$$

Эквивалентное сопротивление при резонансе R_n уменьшается при уменьшении сечения оконечных проволок. Изменяя сечение, можно изменить полосу пропускания фильтра. Проволоки присоединены в узлах колебаний, поэтому шунтирующее действие их на пластинку оказывается небольшим, и полоса фильтра получается узкой.

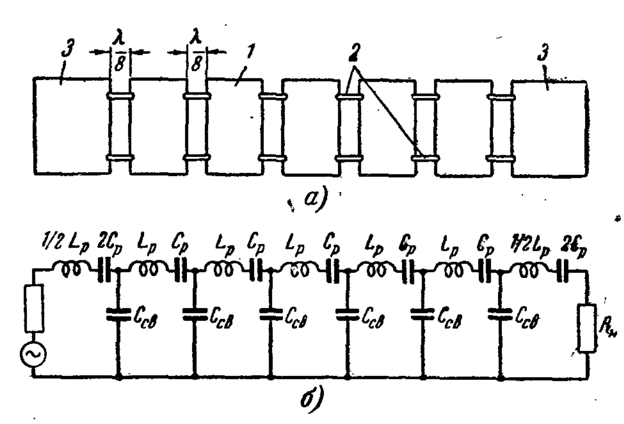


Рис. 15. Механический фильтр на семи тонких прямоугольных пластинках.

а — механическая схема фильтра (*1* — центральные резонаторы, *2* — проволоки связи, *3* — пластинки магнитострикционных преобразователей); *б* — электрическая эквивалентная схема фильтра.

На рис. 15, *а* приведена схема фильтра на семи пластинках. Как видно из механической схемы, ряд плоских пластинок связан парами тонких металлических проволок. Две пластинки по краям, выполненные из никеля, являются избирательными элементами фильтра и служат одновременно магнитострикционными преобразователями. Пять центральных пластин выполняются (с большой точностью) из материала с высокой добротностью и низким температурным коэффициентом. Проволоки связи служат в качестве

135 — 2

нерезонансных соединений между резонирующими пластинками.

Эквивалентная электрическая схема приведена на рис. 15, *б*. В этом типе фильтра, так же как и в ряде предыдущих, резонансные элементы можно представить последовательными контурами, а связи — емкостями на „землю". На концах фильтра последовательные контуры имеют половинную индуктивность и двойную емкость, необходимые для согласования концов фильтра. Это достигается соответствующим подбором размеров и материала пластин, расположенных на концах фильтра.

РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ СТЕРЖНЕВОГО И ПЛАСТИНЧАТОГО ТИПОВ

Расчет механического полосового фильтра практически можно свести к следующему. Сначала составляют эквивалентную электрическую схему фильтра. Для заданной относительной полосы пропускания фильтра $\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_p}$ по формулам для электрических полосовых фильтров находят основные соотношения между индуктивностями и емкостями электрической эквивалентной схемы.

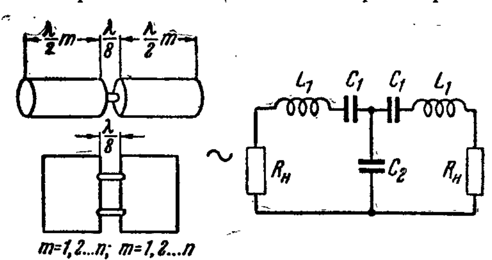


Рис. 16. Двухрезонаторный фильтр с длиной связки λ/8.

В соответствии с полученными соотношениями электрических величин находят отношения между характеристическими сопротивлениями отрезков эквивалентной электрической и механической линии. Далее определяют численные значения размеров механических элементов в соответствии с типом механических резонаторов и связок и применяемым видом колебаний. Затухание, вносимое на концах для согласования фильтра, подбирают опытным путем.

На рис. 16 приведена эквивалентная электрическая схема для случая двухрезонаторного механического фильтра.

Ниже рассматривается расчет механических фильтров с резонаторами в виде стержней, длина которых кратна целому числу полуволн, а также в виде прямоугольных тонких пластинок ($m=1, 2 \ldots n$). На рис. 16 приведен пример, когда проволоки связи имеют длину $\lambda/8$.

На электрической схеме резонаторы представлены последовательными контурами L_1C_1, связка заменена емкостью на „землю" C_2. Сопротивления нагрузок $R_н$ определяются потерями в резонаторах.

Из анализа двухконтурного электрического полосового фильтра следует, что отношение полосы пропускания $2\Delta f_{0,7}=f_в-f_н$ к наинизшей частоте среза $f_н$ определяется соотношением последовательной емкости C_1 к емкости на „землю" C_2:

$$\frac{f_в-f_н}{f_н}=\frac{C_1}{C_2}, \quad (4)$$

где $f_н$ — нижняя, а $f_в$ — верхняя частота среза фильтра.

Оба резонатора фильтра настраиваются на нижнюю частоту среза $f_н$, так как из анализа электрического фильтра следует, что нижняя частота среза определяется резонансной частотой последовательного плеча, а именно

$$f_н=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}. \quad (5)$$

Теперь определим приближенное эквивалентное выражение для ширины полосы механического фильтра. Из анализа схем замещения отрезка электрической длинной линии, который эквивалентен механической длинной линии, четырехполюсником с сосредоточенными параметрами следует, что характеристическое сопротивление резонатора Z_p определяется характеристическим сопротивлением последовательного контура

$$Z_p=\frac{2}{\pi}\cdot\sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (6)$$

Стержни или провода связи имеют длину $\lambda/8$; их полное характеристическое сопротивление $Z_{св}$ можно выразить через реактивное сопротивление емкости

$$Z_{св}=\frac{1}{2\pi f_н C_2}. \quad (7)$$

Сопоставляя механические и эквивалентные электрические параметры фильтра, находим, что относительная полоса пропускания двухрезонансного фильтра пропорциональна отношению характеристических сопротивлений резонатора и связи, а именно

$$\frac{f_в - f_н}{f_н} \approx \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Z_{св}}{Z_р}. \qquad (8)$$

Однако на практике полоса фильтра лежит в пределах

$$\frac{f_в - f_н}{f_н} \approx \frac{(2,2 \div 2,5)}{\pi} \cdot \frac{Z_{св}}{Z_р}. \qquad (9)$$

Сопротивления нагрузки $R_н$ определяют добротность резонаторов. Для того чтобы частотная характеристика фильтра имела заданную полосу пропускания и не содержала на средней частоте провал, необходимо, чтобы эквивалентное затухание резонаторов d удовлетворяло следующему условию:

$$d = 0,71 \frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н}. \qquad (10)$$

Коэффициент прямоугольности частотной характеристики фильтра лучше, когда выполняется условие

$$d = 0,32 \frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н}. \qquad (10а)$$

Однако частотная характеристика будет иметь провал на средней частоте до уровня 0,7 по напряжению.

Для улучшения избирательных свойств фильтра увеличивают количество входящих в него звеньев. Схемы многозвенных фильтров состоят из большого числа последовательно соединенных Т-образных ячеек. Схема одной такой ячейки нами уже рассмотрена, она представляет собой двухконтурный полосовой фильтр, изображенный на рис. 16. Схемы многозвенных электрических фильтров приводились на рис. 11, 13 и 15 в качестве электрических аналогов многорезонаторных механических фильтров. При последовательном соединении двух или большего числа Т-образных ячеек емкость центральных контуров C_1 (рис. 16) уменьшается, а индуктивность увеличивается в 2 раза. Следовательно, отношение полосы пропускания $f_в - f_н$ к наинизшей частоте

среза $f_н$ будет определяться соотношением двойной емкости центрального контура к емкости на землю:

$$\frac{f_н - f_в}{f_н} = \frac{2C_1}{C_2} = \frac{(4,4 \div 5)}{\pi} \cdot \frac{Z_с}{Z_р}, \qquad (11)$$

где $Z_р$ — характеристическое сопротивление центрального резонатора.

На концах фильтра стоят нагрузочные сопротивления (рис. 11, 13 и 15). Они выбираются таким образом, чтобы затухание концевых резонаторов было равно $d_к$, определяемому из выражения (10). Средние резонаторы должны иметь высокую эквивалентную добротность.

В фильтрах другого типа резонаторы выполняются в виде стержней, длина которых равна $\lambda/2$, а длина стержней-связок равна $\lambda/4$. Относительная ширина полосы такого фильтра зависит от отношения полных характеристических сопротивлений центрального резонатора $Z_р$ и связки $Z_{св}$ следующим образом:

$$\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н} = \frac{(3,9 \div 4)}{\pi} \cdot \frac{Z_{св}}{Z_р}. \qquad (12)$$

Нетрудно увидеть, что в случае двухрезонаторного фильтра со связкой $\frac{\lambda}{4}$

$$\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н} = \frac{(1,85 \div 2)}{\pi} \cdot \frac{Z_{св}}{Z_р}. \qquad (13)$$

Затухание концевых резонаторов выбирается таким же, что и в фильтре со связками длиной $\lambda/8$.

Ценой ухудшения формы частотной характеристики полосу фильтров можно сузить. Для этой цели характеристическое сопротивление концевых резонаторов выбирается не равным половине характеристического сопротивления центральных резонаторов. Все резонаторы выполняются с одинаковыми параметрами. Если резонаторы многозвенного фильтра выполнены в виде стержней длиной $\lambda/2$ или прямоугольных пластинок ($m = 1$), а длина связок $\lambda/8$, то относительная полоса фильтра

$$\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{Z_р}{Z_{св}}. \qquad (14)$$

Определим численные значения размеров нескольких механических фильтров. В качестве резонаторов возьмем круг-

лые металлические стержни. Полное характеристическое сопротивление стержня получим из произведения его поперечной площади на внутреннее сопротивление, причем величина внутреннего сопротивления $\sqrt{E\cdot\rho}$, в свою очередь, является произведением плотности материала стержня и скорости распространения продольных волн вдоль стержня.

Так как связка выполняется также в виде стержня, то ее полное характеристическое сопротивление выражается аналогичным образом, а именно

$$Z_{св}=\frac{\pi D_c^2}{4}\cdot\sqrt{E\rho}. \qquad (15)$$

В этом выражении диаметр стержня имеет размерность *см*, модуль упругости *дин/см*^{2}, а плотность материала стержня *г/см*^{3}.

Если длина резонатора $\lambda/2$, а длина связки $\lambda/8$, то относительная полоса многозвенного фильтра зависит от отношения характеристических сопротивлений связки и резонатора следующим образом:

$$\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н}=\frac{(4,4\div 5)}{\pi}\cdot\frac{D_{св}^2}{D_{рез}^2} \qquad (16)$$

При расчете длины элементов фильтра можно воспользоваться данными, приведенными в табл. 1.

Длина резонаторов фильтра с нижней частотой среза 116 *кгц* в случае, если материал резонаторов — инструментальная сталь, равна:

$$l_ц=\frac{\sqrt{E/\rho_ц}}{2f_н}=\frac{5,13\cdot 10^5}{2\cdot 116\cdot 10^3}=2,21 \text{ см}.$$

Если связки выполнены из того же материала, что и центральные резонаторы, то длина их составляет $l_{св}=\lambda/8=0,55$ *см*. Из конструктивных соображений диаметр резонаторов выберем равным 7 *мм*. Диаметр связок можно определить из выражения (16). Предположим, что полоса фильтра равна 10 *кгц*, тогда диаметр связки

$$D_{св}=D_ц\sqrt{\frac{\pi}{4,4}\cdot\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н}}=7\sqrt{\frac{\pi}{4,4}\cdot\frac{10\cdot 10^3}{116\cdot 10^3}}=1,74 \text{ мм}.$$

Чтобы окончить расчет механического фильтра, нужно еще определить размеры концевых резонаторов из феррита.

Таблица 1

Плотность (ρ), скорость распространения звука ($\sqrt{E/\rho}$), внутреннее сопротивление ($\sqrt{E\rho}$) и эквивалентная добротность ($Q_э$) некоторых материалов

Материал	ρ, *г/см*^{3}	$\sqrt{\frac{E}{\rho}}\cdot 10^{-5}$, *см/сек*	$\sqrt{E\rho}\cdot 10^{-6}$, *г/см*^{2}*сек*	$Q_э$
Алюминий	2,73	5,11	1,39	4 000
Бериллиевая бронза	8,26	3,73	3,08	4 000
Дюраль	2,81	5,07	1,43	8 000
Железо Армко	7,76	5,13	3,98	850
Инвар	8,62	4,01	3,46	5 000
Ковар	8,19	4,08	3,34	3 500
Жесткая латунь	8,54	3,64	3,11	2 500
Мягкая латунь	8,50	3,52	2,99	2 000
Медь	8,95	3,72	3,33	1 700
Молибден	10,4	5,63	5,85	1 700
Никель	8,88	4,94	4,39	450
Олово	7,30	2,73	1,99	70
Вольфрам	19,1	4,30	8,20	—
Холоднокатаная сталь	7,71	5,04	3,89	1 100
Инструментальная сталь	7,86	5,13	4,03	900
Нержавеющая сталь	7,94	4,97	3,95	1 500
Феррит	4,6	3,40	1,56	1 000
		4,38	2,01	
Фосфористая бронза	8,90	3,52	3,14	2 000
Манганин	8,40	3,84	3,23	—
Константан	8,80	4,30	3,78	—

Длина магнитострикционных преобразователей также равна половине волны. Данные о скорости распространения продольных волн в ферритовом стержне определяются или из опыта (рис. 10), или из табл. 1:

$$l_к=\frac{\sqrt{E/\rho_к}}{2f_к}=\frac{3,4\cdot 10^5}{2\cdot 116\cdot 10^3}=1,46 \text{ см}.$$

Характеристическое сопротивление концевого резонатора в 2 раза меньше сопротивления центральных резонаторов. Легко найти, что диаметр ферритовых стержней

$$D_к=\frac{1}{\sqrt{2}}D_ц\sqrt[4]{\frac{E/\rho_ц}{E/\rho_к}}=0,707\cdot 7\sqrt[2]{\frac{4,03}{1,56}}\approx 8 \text{ мм}.$$

Ход рассуждений при определении размеров фильтра с четвертьволновыми связками такой же. При расчете фильтров, основанных на кручении, применяются те же общие

выражения для характеристических сопротивлений, что и в случае продольных колебаний. Однако в выражение для характеристического сопротивления стержня, работающего в режиме крутильных колебаний, и в выражение для относительной полосы [ср. формулу (16)] входит не квадрат его диаметра, а четвертая степень. При расчете размеров фильтра на кручении нужно знать отношение Пуассона. Для облегчения расчета эти отношения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Отношение Пуассона для некоторых материалов

Материал	Отношение Пуассона σ	Материал	Отношение Пуассона σ
Сталь . . .	0,27	Олово . . .	0,33
Никель . .	0,31	Медь . . .	0,34
Алюминий .	0,32	Латунь . .	0,37

Расчет механического фильтра на пластинах начнем с определения размеров двухконтурного полосового фильтра. Зависимость резонансной частоты от размеров пластинки была приведена при рассмотрении формы ее резонансных колебаний (рис. 5).

Особенное применение получили колебания пластинок второго рода для отношения высоты к ширине пластинки в пределах от 1 до 3. В отдельных случаях нужно точно знать резонансную частоту пластинки. Для этого можно построить этот участок зависимости частоты от параметров пластинки по точкам $\left(\frac{fb}{\sqrt{E/\rho}} \text{ от } \frac{mb}{L}\right)$. Эти точки в табл. 3 рассчитаны для меди ($\sigma = 0{,}34$), никеля ($\sigma = 0{,}31$) и стали ($\sigma = 0{,}27$).

Таблица 3

Зависимость резонансной частоты от параметров пластинки

$\frac{mb}{L}$	$fb/\sqrt{\frac{E}{\rho}}$			$\frac{mb}{L}$	$fb/\sqrt{\frac{E}{\rho}}$		
	$\sigma=0{,}34$	$\sigma=0{,}31$	$\sigma=0{,}27$		$\sigma=0{,}34$	$\sigma=0{,}31$	$\sigma=0{,}27$
1,0	0,571	0,563	0,554	1,75	0,910	0,907	0,903
1,1	0,609	0,602	0,592	2,0	1,018	1,020	1,021
1,3	0,697	0,691	0,683	2,4	1,176	1,184	1,193
1,5	0,792	0,787	0,782	2,95	1,285	1,300	1,320

Для других материалов частоту пластинки можно найти, взяв на построенном графике точку в соответствии со значением отношения Пуассона (см. табл. 2).

Предположим, что нижняя частота среза фильтра равна 116 *кгц*, а полоса пропускания 500 *гц*. Требуется определить размеры двух пластинок и двух проволок связи (рис. 16).

Отношение характеристических сопротивлений пластинки и связок определяют относительную ширину полосы фильтра. Связка представляет собой тонкий стержень, и выражение для сопротивления стержня нам уже известно (15). Другое дело определить характеристическое сопротивление пластинки. Оно достаточно сильно зависит от места прикрепления проволоки связи к торцу пластинки. Если связка присоединена к пучности колебаний, то характеристическое сопротивление пластинки уменьшается. Это обстоятельство отражается коэффициентом $A(\pm y/b)$ в выражении для характеристического сопротивления пластинки

$$Z_{пл} = b \cdot t \cdot \sqrt{E\rho} \cdot \frac{1}{A(\pm y/b)}, \qquad (17)$$

где b — высота пластинки; t — ее толщина, а $\sqrt{E\rho}$ — внутреннее сопротивление материала пластинки.

На рис. 17 приведены кривые, показывающие коэффициент $A(\pm y/b)$ в зависимости от отношения высоты пластинки к ее ширине и от места прикрепления связки к краю пластинки для второго рода колебаний. Если связка прикреплена к середине пластинки, то $y/b = 0$, а на краю пластинки $y/b = 0{,}5$.

Для простоты расчетов примем, что отношение ширины пластинки к ее высоте равно единице. Высоту квадратной пластинки, настроенной на частоту 116 *кгц*, можно определить из табл. 3, а именно при $m = 1$ должно выполняться условие $\frac{f_н b}{\sqrt{E/\rho}} = 0{,}563$. Следовательно,

$$b = L = 0{,}563 \frac{\sqrt{E/\rho}}{f_н} = 0{,}563 \cdot \frac{4{,}94 \cdot 10^5}{116 \cdot 10^3} = 24 \text{ мм}.$$

Подставим в выражение (9) для относительной полосы фильтра значения характеристических сопротивлений двух связок длиной $\lambda/8$ и пластинки

$$\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н} = (1{,}1 \div 1{,}25)\, \frac{D_{св}^2}{b \cdot t} \cdot \frac{\sqrt{E/\rho_{св}}}{\sqrt{E/\rho_{пл}}} \cdot A(\pm y/b). \qquad (18)$$

Из этого выражения можно определить место прикрепления связки к краю пластинки.

В качестве материала для пластинок применяется никелевая лента толщиной 0,1÷0,5 *мм*, а для связок—проволока из никеля, молибдена, меди, стали и др. Толщина проволок выбирается в пределах от 0,2 до 0,5 *мм*.

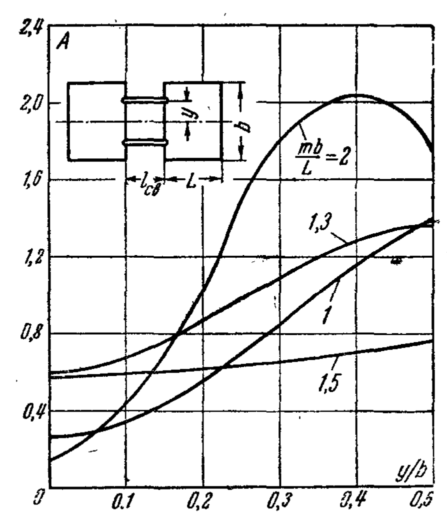


Рис. 17. Зависимость величины A от места прикрепления связки к краю пластинки.

Предположим, что толщина никелевых пластинок 0,5 *мм*, а материал связок — молибденовая проволока диаметром $D_{св}=0{,}2$ *мм*. Из табл. 1 получаем значения внутренних сопротивлений для никеля $\sqrt{E\rho_{пл}}=4{,}39\cdot10^6$ и для молибдена $\sqrt{E\cdot\rho_{св}}=5{,}85\cdot10^6$. Тогда, применяя выражение (18), получаем значение коэффициента $A(\pm y/b)$ равным:

$$A(\pm y/b)=\frac{2\Delta f_{0,7}}{f_н}\cdot\frac{1}{(1{,}1\div1{,}25)}\cdot\frac{bt}{D_{св}^2}\cdot\frac{\sqrt{E/\rho_{пл}}}{\sqrt{E/\rho_{св}}}=$$

$$=\frac{500}{116\cdot10^3}\cdot\frac{1}{(1{,}1\div1{,}25)}\cdot\frac{24\cdot0{,}5}{0{,}04}\cdot\frac{4{,}39}{5{,}85}=0{,}78\div0{,}88.$$

Для $mb/L=1$ из кривой на рис. 17 находим величину y/b, равную 0,29. Следовательно, расстояние между двумя проволочными связками $2y$ равно $0{,}58b\approx14$ *мм*. Из выражения (10а) добротность никелевых резонаторов должна быть

равна 320; это достигается искусственным демпфированием пластинок. Длина связок равна:

$$l_{св}=\frac{\lambda}{8}=\frac{\sqrt{E/\rho_{св}}}{8\cdot f_н}=\frac{5{,}63\cdot10^5}{8\cdot116\cdot10^3}=6\ мм.$$

Для того чтобы получить более широкую полосу пропускания или лучшую избирательность фильтра, нельзя ограничиться двумя никелевыми резонаторами. Для этого случая рассчитаем полосовой фильтр, в состав которого входят не две, а три, четыре или больше никелевых пластинок. Пусть нижняя частота среза равна 116 *кгц*, а полоса фильтра 2,5 *кгц*. Толщина центральных пластинок $t_ц=0{,}5$ *мм*, а толщина концевых никелевых пластинок должна быть в 2 раза меньше. Наиболее прочной получается конструкция фильтра с молибденовыми связками. Предположим, что в нашем распоряжении имеется молибденовая проволока диаметром $D_{св}=0{,}3$ *мм*.

Связки имеют длину $\lambda/8$, следовательно,

$$l_{св}=6\ мм.$$

Если отношение высоты пластинки к ее ширине равно 2 и $m=1$, то размеры концевых и центральных пластинок следующие:

$$b=1{,}020\,\frac{\sqrt{E/\rho_{пл}}}{f_н}=1{,}020\cdot\frac{4{,}94\cdot10^5}{116\cdot10^3}=43{,}5\ мм;$$

$$L=\frac{1}{2}\,b=21{,}75\ мм.$$

Относительная полоса фильтра равна 0,0215. Полученных данных достаточно, чтобы определить место прикрепления связки к краю пластинки.

$$A(\pm y/b)=\frac{2\Delta f_{0,7}/f_н}{(2{,}2\div2{,}5)}\cdot\frac{b\cdot t_ц}{D_{св}^2}\cdot\frac{\sqrt{E/\rho_{пл}}}{\sqrt{E/\rho_{св}}}=$$

$$=\frac{0{,}0215}{(2{,}2\div2{,}5)}\cdot\frac{43{,}5\cdot0{,}5}{0{,}09}\cdot\frac{4{,}39}{5{,}85}=1{,}57\div1{,}78.$$

Из рис. 17 получаем, что проволочные связки должны отстоять друг от друга на расстоянии $2y=b\cdot2\,(0{,}27\div0{,}29)=$ $=23\div25$ *мм*.

Эквивалентная добротность концевых пластинок должна составлять 60—70. Центральные пластинки имеют доброт-

ность 450 (см. табл. 1). Из конструктивных соображений число пластинок в фильтре не должно превышать 6—7.

С увеличением количества пластинок характеристика фильтра становится все более прямоугольной и появляется возможность обеспечить большие уровни затухания в полосе непропускания фильтра. Однако лучшие результаты могут быть достигнуты при использовании в качестве центральных резонаторов пластинок из высокодобротного материала, например из стали или из бронзы. В высококачественных механических полосовых фильтрах в качестве центральных резонаторов все же стараются не применять никелевые пластинки.

Рассчитаем полосовой многозвенный фильтр, в котором в качестве центральных резонаторов выбраны пластинки из бериллиевой бронзы. Нижняя частота среза по-прежнему равна 116 *кгц*, а полоса пропускания 12 *кгц*.

Начнем расчет с бронзовых пластинок. Остановимся на отношении высоты к ширине $\frac{mb}{L}=1{,}556$; $m=1$. Для этого случая резонатор из бронзы с отношением Пуассона, как у меди ($\sigma \approx 0{,}34$), имеет величину $\frac{fb}{v}=0{,}818$. Размеры пластинки из бронзы находим равными:

$$b=0{,}818\cdot\frac{v}{f}=0{,}818\frac{3{,}73\cdot10^5}{116\cdot10^3}=2{,}63\ см;\ L=1{,}75\ см.$$

Связки из молибденовой проволоки имеют большое внутреннее сопротивление; это помогает расширить полосу фильтра. Их длина $\lambda/8$

$$l_{св}=6\ мм.$$

Предположим, что в наличии имеется листовая бериллиевая бронза толщиной $t_ц=0{,}18$ *мм* и молибденовая проволока с $D_{св}=0{,}4$ *мм*. Связи отстоят друг от друга настолько, чтобы выполнялись условия $y/b=0{,}45$. Из рис. 16 находим, что параметр $A(y/b)$ равен 0,7. Поэтому ширина полосы

$$2\Delta f=f_н\frac{2{,}2D_{св}^2}{bt}\cdot\frac{\sqrt{E\rho_{св}}}{\sqrt{E\rho_{пл}}}A(y/b)=$$

$$=116\cdot\frac{2{,}2\cdot0{,}4^2\cdot0{,}73}{26{,}3\cdot0{,}18}\times\frac{5{,}85\cdot10^6}{3{,}08\cdot10^6}=12\ кгц.$$

Для согласования фильтра характеристическое сопротивление концевых никелевых резонаторов должно составлять половину от характеристического сопротивления бронзовых. Предположим имеется никель толщиной 0,1 *мм*. Для согласования удобно, чтобы коэффициент $A(y/b)$ для никеля был больше соответствующего коэффициента для бронзы. Условие согласования характеристических сопротивлений никелевых и бронзовых пластинок удовлетворяется при отношении высоты к ширине никеля, равном 1. При подборе величин, входящих в условие согласования (рис. 17), удобно выбрать высоту никелевой пластинки, приблизительно равную высоте пластинки из бериллиевой бронзы, а именно для никеля $b=L=0{,}563\frac{v}{f_н}=2{,}4\ см$. Приведенные данные легко проверить, подсчитав характеристические сопротивления никелевой и бронзовой пластинок.

Следует отметить, что расстояние между связками, соединяющими как бронзовые пластинки между собой, так и соединяющими никелевую пластинку с бронзовой, во всех звеньях фильтра должно оставаться постоянным.

Для никелевых магнитострикционных преобразователей $b_к=L_к=24$ *мм*, а $t_к=0{,}1$ *мм*. Добротность никелевых пластинок должна быть не выше 16. Связки имеют размеры: $l_{св}=6{,}0$ *мм*; $D_{св}=0{,}4$ *мм*; $2y=24$ *мм*. Материал связок — молибден. Расстояние между связками 21 *мм*. Центральные резонаторы — из бериллиевой бронзы: $b_ц=26{,}3$ *мм*; $L_ц=17{,}5$ *мм*; $t_ц=0{,}18$ *мм*.

Для более высокочастотных фильтров, например на частоту 465 *кгц*, расчет ведется таким же порядком. При расчете узкополосных фильтров следует точнее совмещать резонансные частоты концевых никелевых пластинок и центральных пластинок из высокодобротного материала. Для этой цели в основном и были приведены в табл. 3 уточненные коэффициенты, необходимые при расчете размеров пластинок.

ТОЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИЛЬТРОВ

Одним из условий, определяющих точность изготовления элементов фильтра, является требование, чтобы резонаторы, входящие в состав механического фильтра, были выполнены с таким расчетом, чтобы их частотные характеристики по внешнему виду напоминали частотную характеристику электрического контура.

Частотная характеристика неточно выполненного резонатора будет иметь несколько пиков, расположенных вблизи

от расчетной резонансной частоты. Если резонаторами являются пластинки с большим отношением высоты к ширине, то промеры ширины и высоты пластинки, взятые в различных точках вдоль горизонтальной оси x и вдоль вертикальной y (рис. 5, a), должны отличаться между собой меньше, чем на величину, определяемую шириной полосы пропускания пластинки:

$$\frac{\Delta L}{L} < \frac{1}{Q_э};$$

$$\frac{\Delta b}{b} < \frac{1}{Q_э};$$

для резонаторов стержневого типа имеет смысл считать, что

$$\frac{\Delta l}{l} < \frac{1}{Q_э}, \qquad (19)$$

где $Q_э$ — эквивалентная добротность рассматриваемого резонатора.

Резонаторы могут иметь строго геометрическую форму, но отличаться своими размерами. Например, прямоугольные пластинки могут иметь строго параллельные грани, однако в состав одного фильтра могут входить пластинки с немного отличающейся высотой или шириной (δb или δL). Резонансные частоты и характеристические сопротивления таких пластинок будут разными. Все это приведет к тому, что фильтр в целом будет иметь нерезко выраженную полосу $2\Delta f_ф$, иными словами, срезы частотной характеристики не получатся крутыми.

Поэтому, для того чтобы фильтр обладал хорошими избирательными свойствами, размеры резонаторов и связок должны иметь разброс не хуже, чем

$$\frac{\delta L}{L} < 0{,}1 \cdot \frac{2\Delta f_ф}{f_н}$$

или

$$\frac{\delta l_{св}}{l_{св}} < 0{,}1 \cdot \frac{2\Delta f_ф}{f_н} \cdot \frac{Z_p}{Z_c} \approx 0{,}1. \qquad (20)$$

В случае, когда резонаторы — пластинки, а связки выполнены в виде проволок, различие связей между собой в пределах одной пары связок искажает форму резонансного колебания пластинки и зависит от места присоедине-

ния концов связок к краю пластинки. Это различие в длине связей можно оценить как

$$\frac{l'_c - l''_c}{l'_c} < \frac{1}{Q_э} \cdot \frac{Z_p}{Z_c} \approx \frac{f_н}{2\Delta f_ф} \cdot \frac{1}{Q_э}. \qquad (21)$$

Отклонение углов пластинки от прямых эквивалентно отклонению размеров пластинки за рамки допустимых.

В заключение приводим показатели точности изготовления рассмотренных выше фильтров.

Многозвенный фильтр на стержнях. Длина резонаторов, равная 22,2 *мм*, может иметь разброс +0,1 *мм*. Их торцы должны быть параллельны с точностью +0,01 *мм*. Длина связок равна 5,5 *мм*, а точность их изготовления +0,2 *мм*. Длина концевых ферритовых резонаторов, равная 24,1 *мм*, должна быть выполнена с точностью +0,1 *мм*.

Фильтр на двух никелевых пластинках. Размеры пластинок $b = L = 24$ *мм* имеют допуск +0,01 *мм*. Разница между связками по длине должна быть меньше 0,3 *мм*.

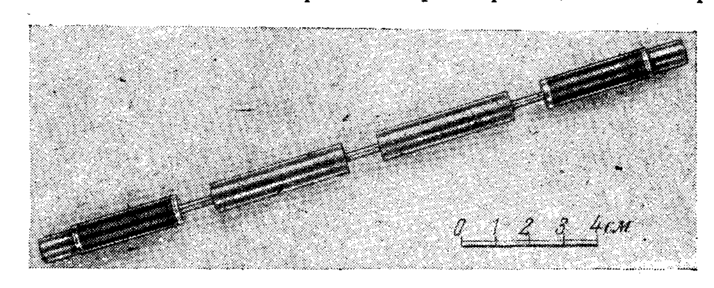
Многозвенный фильтр на никелевых пластинках. Количество пластинок — больше двух. Грани пластинок должны быть параллельны с точностью +0,01 *мм* для размера 21,75 *мм* и с точностью +0,02 *мм* для размера 43,5 *мм*. Разброс пластинок по ширине составляет +0,04 *мм*, а по высоте +0,1 *мм*. Связки во всем фильтре имеют одинаковую длину. Точность изготовления связок +0,06 *мм*.

В последнем примере рассчитывался фильтр (стр. 30), у которого концевые пластинки выполнены из никеля, а центральные пластинки — из бериллиевой бронзы. Никелевые резонаторы демпфируются; для согласования фильтра на концах $Q_э$ этих пластинок приблизительно равна 16. Следовательно, они должны быть выполнены с точностью 24+0,1 *мм*. Бронзовые резонаторы имеют размеры $b = 26{,}3$ *мм* и $L_ц = 17{,}5$ *мм*. Горизонтальные грани пластинок должны быть параллельны с точностью +0,002 *мм* а вертикальные грани — с точностью 0,001 *мм*. Допустимый разброс пластинок по ширине составляет +0,05 *мм*, а по высоте +0,1 *мм*. Точность изготовления связок равна +0,015 *мм*. Следует отметить, что при недостаточной точности изготовления связок увеличивается нестабильность вершины частотной характеристики фильтра.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА ФИЛЬТРОВ

Изготовление стержневого фильтра отличается сравнительной простотой. Материалом для него служит сталь. Фильтр вытачивается на токарном станке. На рис. 18, *а* показан внешний вид собранного фильтра. Длина всех резонаторов равна $\lambda/2$, а длина связок $\lambda/8$. Концевые ферритовые резонаторы также обтачиваются на токарном станке до нужного размера $l_ф$, $D_ф$. Чтобы длина концевого резонатора равнялась $\lambda/2$, к ферритам добавлены стальные стерженьки с половинным характеристическим сопротивлением. Длина каждого из стерженьков

а)



б)

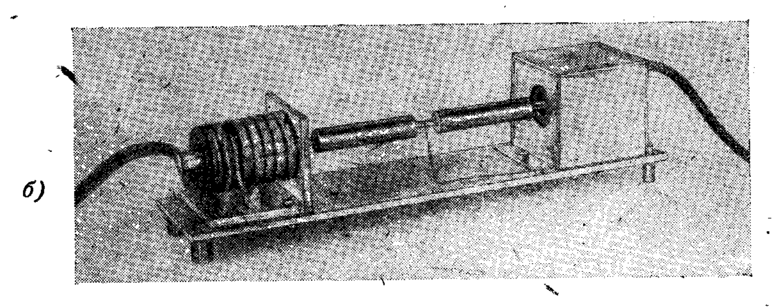


Рис. 18. Пример механического фильтра стержневого типа на 70 *кгц*.

а — внешний вид полосовой системы; *б* — конструктивное оформление фильтра с электромагнитами.

$$l_c = \frac{\sqrt{E/\rho_c}}{2f_0}\left(1 - l_ф \cdot \frac{2f_0}{\sqrt{E/\rho_ф}}\right). \qquad (22)$$

Все элементы фильтра (ферриты, стальные добавки и система, состоящая из стальных резонаторов и связок) скрепляются между собой при помощи клея БФ.

Пластинки можно изготовить следующим образом. Перед нарезанием материала на пластинки его следует прокатать.

Особенно тщательно следует прокатать никелевые пластинки, если никель взят из уже отработавших свой срок высокочастотных пентодов. Нарезанные пластинки вновь выпрямляются путем прокатки. Стучать по пластинкам не следует, так как это может привести к возникновению внутренних напряжений в ней. Нарезанные пластинки должны иметь допуск на дальнейшую обработку в 0,2—0,5 *мм*.

Далее пластинки либо собираются в пакет, зажимаются в тисочки и обрабатываются все вместе, либо подгоняются до нужного размера по отдельности. Обработку граней пластинок можно вести на закрепленном шлифовальном камне с последующей притиркой на стальной плитке.

При обработке граней пластинки необходимо проверять их параллельность путем измерения размеров в различных точках пластинки. Для измерений можно воспользоваться микрометром, укрепленным на стойке. Эти измерения нужно производить так, чтобы пластинка не прогибалась, для этого ее нужно поддерживать. Ось пластинки должна совпадать с осью микрометра. Если при измерении пластинка прогибается и неплотно прилегает к губкам микрометра, то это может означать, что грани пластинки не параллельны. Правильность прямых углов пластинки на 116 *кгц* можно проверить при помощи лекального угольника.

Изготовленные с определенным допуском пластинки фильтра соединяются между собой проволоками. Соединение можно осуществить посредством точечной сварки. Схема устройства для сварки показана на рис. 19.

Для того чтобы сварить связку с пластинкой с суммарной толщиной не более 1 *мм* достаточно иметь мощность сварочного трансформатора не больше 2 *квт*. При точечной сварке механических фильтров на 116 *кгц* обычно достаточно иметь мощность сварочного трансформатора в 1 *квт*, во всяком случае для изготовления всевозможных фильтров на пластинках практически достаточно мощности в 1,5 *квт*, а для фильтров на тонких пластинках (с толщиной 0,1 — — 0,3 *мм*) бывает достаточно 500—700 *вт*. Напряжение на выходе трансформатора выбирают в пределах от 1 до 10 *в*.

Сварочный трансформатор с выходным напряжением 5 *в* и мощностью в 1 *квт* собран на сердечнике из пластин Ш-30 или Ш-32; толщина набора пластин сердечника 10 —

— 12 *см*. Первичная обмотка на 220 *в* содержит 270 витков провода диаметром 1,5 *мм*, а вторичная 6 витков медного провода с поперечным сечением 0,5 *см*².

Из рис. 19 видно, что на неподвижную медную пластину помещается пластинка фильтра, на край которой накладывается конец проволочной связки. В зависимости от размеров пластинки проволочная связка заходит на глубину в 0,3 — 1 *мм*. В точку сварки помещается конец медного жала. При кратковременном нажатии педали пластинка и проволока свариваются.

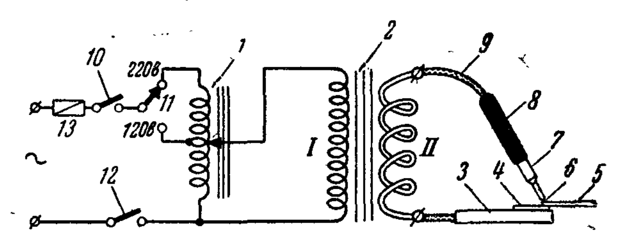


Рис. 19. Простая схема устройства для точечной сварки.

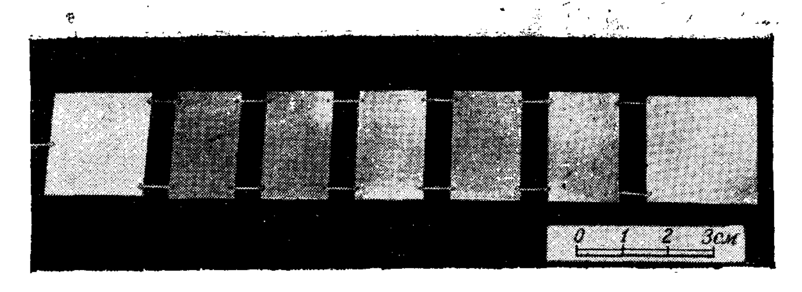
1 — автотрансформатор для регулировки напряжения; *2* — сварочный трансформатор; *3* — неподвижная пластина 10×50×70 *мм*; *4* — пластинка фильтра; *5* — проволока связи фильтра; *6* — место сварки; *7* — жало из меди; *8* — ручка; *9* — плетеный шнур; *10* — выключатель; *11* — переключатель на 120 и 220 *в*; *12* — педаль; *13* — предохранитель.

Хорошо свариваются между собой никель, молибден, бронза, вольфрам и сталь. Плохо сваривается медь с медью.

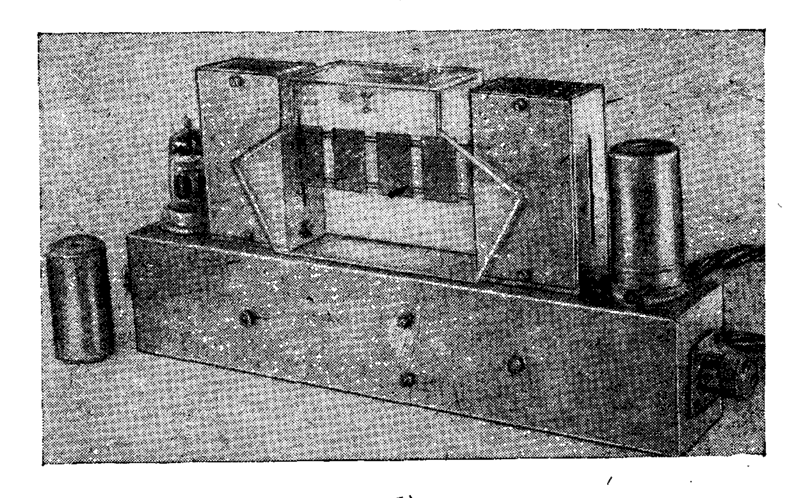
Если медное жало неплотно прижато к свариваемым деталям, то сварка сопровождается искрами и место сварки загрязняется копотью. При этом возможно прогорание проволочной связки и пластинки. Искрение имеет место также, когда свариваемые поверхности загрязнены жиром. Поэтому перед сваркой медную неподвижную пластину и медное жало необходимо почистить наждачной бумагой и вместе со свариваемыми деталями протереть спиртом.

Нужное напряжение на входе трансформатора подбирается опытным путем. Время сварки должно измеряться долями секунды. При продолжительном нажатии педали проволока и пластинка перегреваются и сварка получается непрочной. Кроме того, длительная сварка искажает структуру материала пластинки, приводит ко всякого рода внутренним напряжениям в пластинке, что вредно сказывается на ее частотной характеристике.

Перед сваркой поверхность пластинок размечается тонкими линиями, проведенными острием ланцета. Это позво-



а)



б)

Рис. 20. Пример механического фильтра пластинчатого типа на 150 *кгц*.

а — внешний вид полосовой системы; *б* — конструктивное оформление фильтра.

ляет заранее определить места сварки пластинки с проволочными связками.

После того как к пластинке приварены первые две связки, тщательно измеряется их длина, выступающая за пределы пластинки. Связка обрезается с припуском на длину 0,3 — 1,0 *мм*. Для качественных высокодобротных фильтров заранее нарезаются связки с одинаковой массой. Приваренные связки выпрямляются и накладываются на край следующей пластинки. Предварительно между пластинками вкладывается металлическая полоска, по ширине равная расчетной длине связки. После этого производится сварка свободных концов связок со второй пластинкой.

Чтобы снять внутренние напряжения, вызванные сваркой, пластинки для высококачественных фильтров отжигаются в струе водорода при температуре 600° С. Однако опытным путем установлено, что искажения частотной характеристики пластинки становятся заметны лишь после 3—5 раз сварки со связкой в одном и том же месте.

На рис. 20 показан фильтр на бронзовых пластинках с никелевыми концевыми резонаторами, сваренный описанным способом.

ВКЛЮЧЕНИЕ В СХЕМУ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

На рис. 18,*б* и 20,*б* были показаны примеры конструктивного оформления стержневого и пластинчатого фильтров. С фильтра рис. 18,*б* снят экран, чтобы показать устройство катушки магнитострикционного преобразователя. Подмагничивание осуществляется постоянным электромагнитом. Такой фильтр включается в цепь УПЧ приемника.

Схема приставки с механическим фильтром на пластинках приведена на рис. 21. Из схемы видно, что колебания сигнала промежуточной частоты подаются на управляющую сетку лампы $Л_1$. В цепь анода этой лампы включена катушка L_1, переменное магнитное поле которой вызывает в никелевой пластинке $П_1$ механические колебания с той же частотой. Колебания пластинки $П_1$ передаются механической полосовой системой, состоящей из ряда высокодобротных пластинок $П_2 \ldots П_6$, к концевой пластинке из никеля

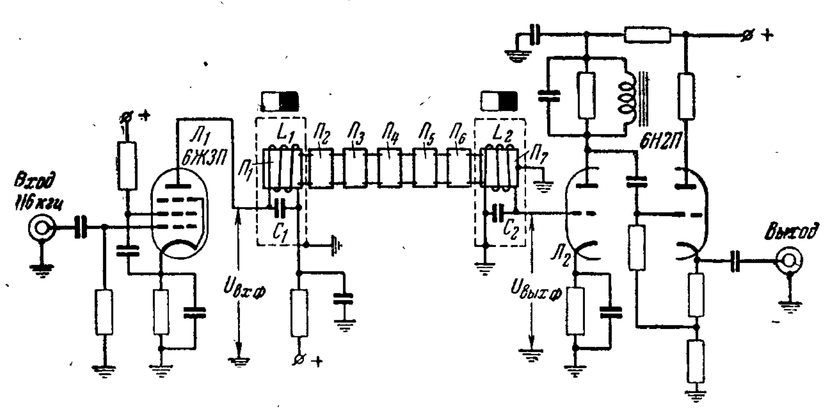


Рис. 21. Включение механического фильтра в схему.

$П_7$. Благодаря обратному магнитострикционному эффекту механические колебания пластинки $П_7$ преобразуются в колебания продольного магнитного поля в катушке L_2. Под воздействием переменного магнитного поля на зажимах катушки L_2 возникает напряжение с частотой сигнала, которое подается на сетку триода $Л_2$, усиливается последующими каскадами и детектируется. Катушки L_1 и L_2 настраиваются емкостями C_1 и C_2 на частоту сигнала.

Если от механического фильтра требуется широкая полоса, то и остальные каскады усиления делаются широкополосными. Назначение этих каскадов — усилить сигнал и отфильтровать паразитные частоты механического фильтра. Крутые склоны частотной характеристики УПЧ обеспечиваются механическими резонаторами. Таким образом, использование такого фильтра позволяет разделить в приемнике блоки, обеспечивающие избирательность, от блоков, обеспечивающих усиление.

Многозвенные полосовые фильтры вносят ослабление, поэтому до механической фильтрации необходимо сигнал усилить настолько, чтобы обеспечить необходимое отношение сигнала к шуму. Обычно магнитострикционный преобразователь фильтра включается либо непосредственно в анодную цепь лампы первого преобразователя частоты приемника, либо в анодную цепь лампы следующего за преобразователем частоты усилителя. Применение каскадов, обеспечивающих основное усиление, после механического фильтра позволяет уменьшить эффекты, связанные с нелинейностью характеристик ламп, например уменьшить перекрестную модуляцию. Сами по себе механические фильтры позволяют получать амплитуды выходного напряжения около 10 *в*.

Для того чтобы обострить срезы частотной характеристики, последовательно с возбуждающей катушкой или с катушкой, снимающей колебания, можно включить катушку, в которой заключен ферритовый стерженек. Через стерженек пропускается постоянное магнитное поле. При совпадении внешней частоты колебаний с собственной частотой ферритового стержня в никелевый магнитострикционный преобразователь уменьшается поступление энергии. На этой частоте ферритовый стержень поглощает энергию и частотная характеристика механического фильтра получается с провалом. Следовательно, за счет этого эффекта можно получить дополнительное ослабление в отдельных точках полосы непропускания фильтра. Если час-

тота механических собственных колебаний ферритового стержня расположена в полосе непропускания вблизи от частоты среза, то крутизна склона характеристики увеличится.

На рис. 22 приведены размеры магнитострикционного преобразователя применительно к фильтру на никелевых пластинках. Экран преобразователя выполнен из меди. Катушка закреплена на боковой стороне экрана. Щель катушки совпадает с щелями на торцовых сторонах экрана. Фильтр либо целиком протаскивается сбоку через щель, либо же должна быть предусмотрена возможность сдвигать один

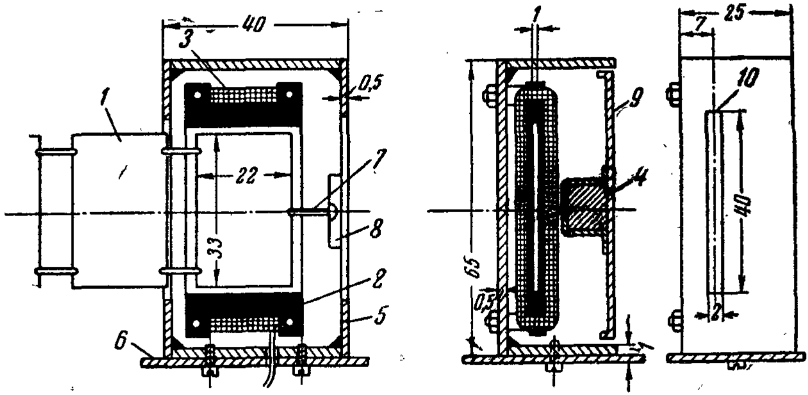


Рис. 22. Эскиз конструкции магнитострикционного преобразователя.

1 — пластинка фильтра; *2* — каркас катушки; *3* — высокочастотная обмотка; *4* — магнит; *5* — экран; *6* — шасси; *7* — четвертьволновая связка; *8* — бортик; *9* — крышка; *10* — щель в экране.

из экранов преобразователя вдоль оси фильтра, чтобы вставить фильтр своими концами в катушки. Плоская катушка выполняется из текстолита толщиной 1*мм*. Ширина щели катушки 1*мм*. Высокочастотная обмотка содержит около 2 000 витков провода ПЭЛ 0,13.

Для настройки катушки в резонанс бывает необходима емкость в 50—60 *пф*. Настройку катушек следует производить при вставленных в катушки никелевых пластинках, которые снижают резонансную частоту на 10—20%. Из-за больших потерь на вихревые токи в никелевых пластинках добротность плоских катушек составляет 4÷5.

Крепится фильтр четвертьволновыми связками с бортиком внутри экрана. Эквивалентная схема связки дана на рис. 7, *д*. Связка в области полосы пропускания представляет собой короткое замыкание, кроме того, она электрически заземляет механический фильтр, чтобы устранить

влияние проходных емкостей между катушками преобразователей и концевыми пластинками.

В качестве магнитов смещения использовались корректирующие магниты от телевизионных трубок. Ценой уменьшения коэффициента передачи фильтра приблизительно в 2—3 раза такие магниты смещения можно заменить электромагнитами, обмотки которых располагаются на плоских катушках в виде отдельной секции. Обмотка такого электромагнита содержит также около 2 000 витков провода ПЭЛ 0,13. Постоянный ток в обмотке составляет примерно 20 *ма*. Катушку, снимающую колебания с механического фильтра, также можно питать постоянным током через параллельный контур, резонансное сопротивление которого на порядок выше резонансного сопротивления плоской катушки.

В случае двухконтурного полосового фильтра плоские катушки крепятся на общем немагнитном основании, например из меди. В катушки вставляется полосовая система, состоящая из двух пластинок, соединенных проволочными связками. На основании фильтра устанавливаются штырьки, к которым припаиваются концы четвертьволновых связок, закрепляющих пластинки внутри плоских катушек. Чтобы ликвидировать прямую наводку, входную катушку следует поместить в запаянный экран из пермаллоя, а выходную катушку в медный экран. Экраны должны иметь щели для проволочных связок.

На рис. 23, 24 и 25 приведены частотные характеристики нескольких механических фильтров.

Характеристика узкополосного фильтра на двух никелевых пластинах с парой медных связок в $\lambda/4$ размерами $b = L = 23{,}5 + 0{,}01$ *мм*, $t = 0{,}5$ *мм*, $D_{св} = 0{,}25$ *мм*, $l_{св} = 7{,}9 + 0{,}1$ *мм* и $2y = 11$ *мм* дана на рис. 23 (кривая *1*). Средняя частота фильтра 119 *кгц*. Ширина полосы пропускания 430 *гц*. Коэффициент прямоугольности на уровне 0,1 по напряжению $K_{0,1}$ равен 3,4. Расчетная полоса 300 *гц*. При такой узкой полосе собственное затухание никелевых пластинок получается больше расчетной величины. Вследствие этого полоса расширяется, а $K_{0,1}$ увеличивается. Дальнейшее сужение полосы фильтра можно получить применением одной дополнительной центральной пластинки с высокой эквивалентной добротностью.

Частотная характеристика двухрезонаторного фильтра с молибденовыми связками приведена на том же рис. 23

(кривая *2*). Никелевые пластинки и связки имеют $b = L = 23{,}8 + 0{,}01$ *мм*; $t = 0{,}5$ *мм*; $l_{св} = \lambda/7 = 7$ *мм*; $D_{св} = 0{,}3$ *мм*; $2y = 11$ *мм*. Средняя частота фильтра 118,5 *кгц*. Полоса пропускания 600 *гц*. Коэффициент прямоугольности по уровню $0{,}1\,K_{0,1}$ равен 2. Электрический двухконтурный полосовой фильтр с таким же провалом частотной характеристики до уровня 0,8 имел бы коэффициент прямоугольности $K_{0,1}$ равным 2,6. Это объясняется тем, что приведенные на рис. 7 схемы замещения отрезков длинных линий носят упрощенный характер, а на самом деле эквивалентная схема двухрезонаторного механического фильтра несколько сложнее двухконтурного полосового фильтра. На второй гармонике первого рода колебаний этот же фильтр имеет полосу пропускания 1 600 *гц* при $f_0 = 125$ *кгц* и $K_{0,1} = 2$.

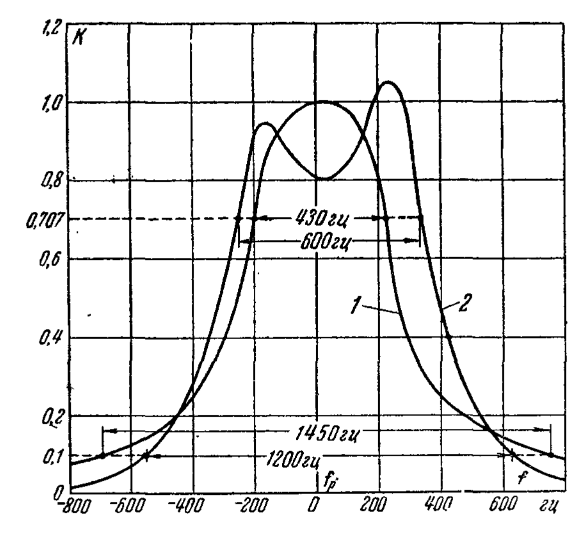


Рис. 23. Частотные характеристики фильтров на двух никелевых пластинках.

1 — медные связки $\lambda/8$ при $f_p = 119$ *кгц*; *2* — молибденовые связки $\lambda/7$ при $f_p = 118{,}5$ *кгц*.

Фильтр с одной пластинкой из бериллиевой бронзы и двумя возбуждающими проволоками в $3\lambda/4$ имеет эквивалентную добротность 2 000 и размеры: $b = 24{,}5 + 0{,}01$ *мм*, $t = 0{,}18$ *мм*, $L = 15{,}4 + 0{,}005$ *мм* и $D_{пр} = 0{,}5$ *мм* (рис. 14).

Частотная характеристика многозвенного полосового фильтра на шести никелевых пластинках дана на рис. 24. Размеры двух концевых пластинок: $b_к = 32{,}5 + 0{,}02$ *мм*, $L_к = 16{,}25 + 0{,}01$ *мм* и $t_к = 0{,}3$ *мм*. Размеры четырех центральных пластинок: $b_ц = 32{,}5 + 0{,}02$ *мм*, $L_ц = 16{,}25 + 0{,}01$ *мм* и $t_ц = 0{,}5$ *мм*. Молибденовые связки имеют размеры: $l_{св} = 4{,}5 + 0{,}1$ *мм*, $D_{св} = 0{,}2$ *мм* и $2y = 26$ *мм*.

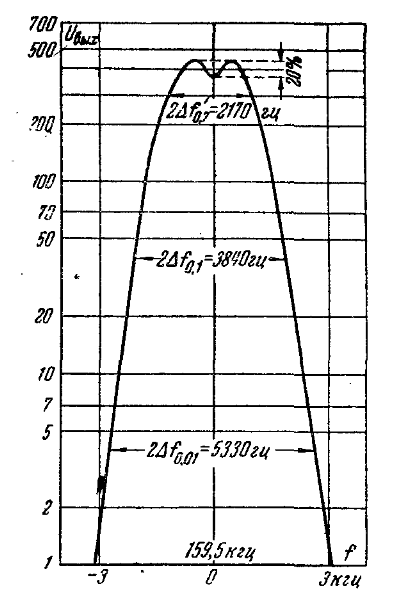


Рис. 24. Частотная характеристика фильтра на шести никелевых пластинках.

Рис. 25. Частотная характеристика фильтра на четырех пластинках из бериллиевой бронзы и двух никелевых пластинках.

Полоса пропускания фильтра равна 2,17 *кгц*. Средняя частота 159,5 *кгц*. Коэффициенты прямоугольности по уровням ослабления напряжения помехи 0,1, 0,01 и 0,001 соответственно равны $K_{0,1} = 1{,}77$, $K_{0,01} = 2{,}46$ и $K_{0,001} = 3{,}2$.

Фильтр на бронзовых и никелевых пластинках на второй гармонике первого рода колебаний имеет частотную характеристику, изображенную на рис. 25. $Q_э$ пластинок на второй гармонике получается меньше, следовательно, точность изготовления центральных пластинок можно уменьшить. Размеры концевых никелевых пластинок: $b_к = L_к =$

$=22,0$ *мм* $+0,05$ *мм* и $t_к=0,1$ *мм*. Размеры четырех центральных пластинок из бериллиевой бронзы: $t_ц=0,18$ *мм*, $b_ц=24,5+0,01$ *мм* и $L_ц=15,4+0,005$ *мм*. Размеры молибденовых связок: $l_{св}=4+0,1$ *мм*, $D_{св}=0,3$ *мм* и $2y=20$ *мм*. Полоса пропускания фильтра равна 10 *кгц*. Средняя частота фильтра 142 *кгц*. Коэффициент прямоугольности характеристики по уровню 0,01

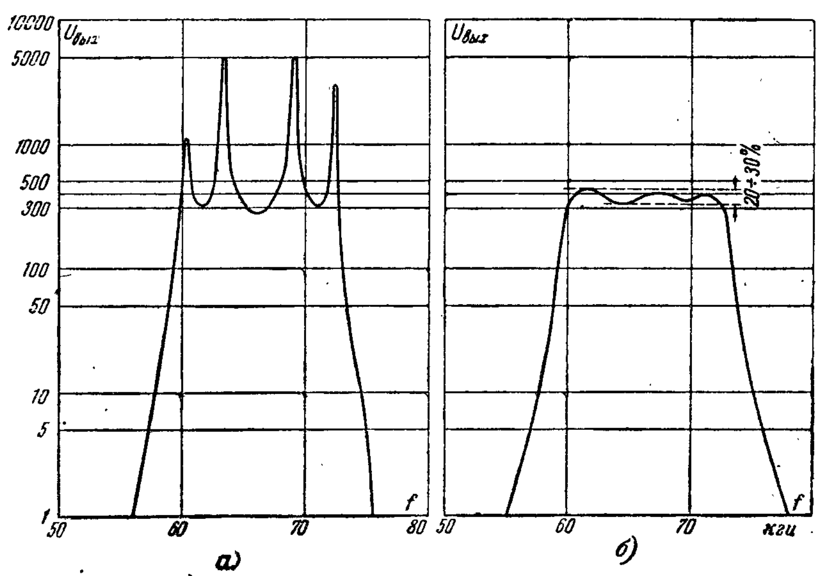


Рис. 26. Влияние затухания, вносимого на концах стержневого фильтра

а — добротность концевых резонаторов равна 1 000; *б* — в концевые ферритовые резонаторы внесено затухание.

равен $K_{0,01}=1,7$. При большом количестве высокодобротных центральных резонаторов ослабление механического фильтра в полосе непропускания достигает по напряжению уровня 0,001.

Фильтры, использующие колебания прямоугольных пластинок, крепятся к основанию при помощи четвертьволновых связок, как показано на рис. 22. Связка крепления приваривается или припаивается к середине края концевой пластинки. Характеристическое сопротивление связки крепления во много раз меньше характеристического сопротивления концевой пластинки. В качестве крепления применялись

медная проволока диаметром $D_{кр}=0,25$ *мм* и молибденовая проволока диаметром $D_{кр}=0,2$ *мм*.

Если механический фильтр выполнен точно по расчету, то остается только внести в концевые резонаторы необходимое затухание. Это достигается помещением резонаторов в вязкую среду, например в вазелин. Можно покрыть концевые резонаторы тонким слоем резинового клея. Однако наиболее удобно покрыть концевые резонаторы шеллаком; слой высохнувшего шеллака в 0,06 *мм* снижает добротность пластинки из никеля толщиной 0,1 *мм* до 50—60. Сильное затухание вносит в пластинку слой несохнущей вязкой вакуумной смазки.

Например, концевые резонаторы фильтра на шести никелевых пластинках (частотная характеристика фильтра дана на рис. 24) с обеих сторон покрыты тонким слоем шеллака. Частотная характеристика фильтра с центральными пластинками из бериллиевой бронзы имеет более широкую полосу пропускания и поэтому в концевые резонаторы следует внести более сильное затухание. В этом фильтре концевые никелевые резонаторы покрыты несохнущей вакуумной смазкой. Слой смазки заметно увеличивает массу тонкой никелевой пластинки, а это соответствует увеличению индуктивности последовательного контура на эквивалентной электрической схеме пластинки. Резонансная частота пластинки снижается, поэтому, чтобы резонансная частота концевых и центральных пластинок была одинаковой, вместо расчетной величины $b_к=L_к=23$ *мм* размеры концевых пластинок были взяты равными $b_к=L_к=22$ *мм*. В приведенных примерах двухрезонаторных фильтров (рис. 23) никелевые пластинки не демпфировались.

По сравнению с тонкими пластинками ферритовые стержневые резонаторы обладают большей массой и внести в них затухание труднее. Требуемое затухание в этом случае можно внести подбором зазора между стержнем и катушкой преобразователя, заполнив зазор вязкой средой. Например, стержень можно обернуть одним-двумя слоями кальки, предварительно покрытой смазкой, и туго вставить в катушку преобразователя. Дальнейшее улучшение частотной характеристики достигается помещением на концах фильтра постоянных магнитов в виде стержней длиной в $\lambda/4$, отделенных от торцов концевых резонаторов густым слоем смазки. Вся система крепится в катушках преобразователей резиновыми пробками.

На рис. 26 приведен пример согласования стержневого фильтра, изображенного на рис. 18,*а*. Согласование достигнуто путем заполнения зазора в катушках преобразователей обыкновенным пластелином (пластелин одновременно крепит фильтр в катушках).

Концевые резонаторы и внутренняя поверхность катушек электромеханических преобразователей заранее покрываются тонким слоем пластелина и затем нагретый резонатор вставляется в катушку. Остывший пластелин позволяет получать в концевом резонаторе затухание, обеспечивающее допустимую неравномерность вершины частотной характеристики.

Два центральных резонатора фильтра (рис. 18,*а*) и связки из нержавеющей стали выполнены с размерами $D_ц = 9$ *мм*, $l_ц = 40 + 0{,}03$ *мм*, $D_{св} = 2{,}9$ *мм* и $l_{св} = 10 + 0{,}1$ *мм*. Концевые резонаторы, состоящие из стального основания, ферритового стержня и стальной добавки, образуют общую длину $\frac{\lambda}{2}$. Стальные основания, необходимые для более прочного крепления феррита к связкам, и стальные добавки имеют диаметр 6,3 *мм*. Диаметр феррита 8,1 *мм*. Постоянные магниты выточены в виде цилиндров с размерами $D_м = 7$ *мм* и $l_м = 20$ *мм*; они помещаются в катушки электромеханических преобразователей с обоих концов фильтра.

В механических фильтрах стержневого типа получили применение ферриты следующего состава:

1) феррит с максимальной магнитострикцией, содержащий 50% окиси железа и 50% окиси никеля;

2) феррит с максимальной магнитной проницаемостью, содержащий 50% окиси железа, 36% окиси цинка и 14% окиси никеля.

В фильтре, показанном на рис. 18,*а*, применен феррит с максимальной магнитострикцией. Расчетная величина диаметра ферритового стержня равна $D_к \approx 8{,}8$ *мм*. Однако следует учесть массу смазки, вносящей в концевой резонатор необходимое затухание. Смазка увеличивает диаметр и соответственно характеристическое сопротивление концевого резонатора. Для того чтобы характеристическое сопротивление концевого стержня было вдвое меньше характеристического сопротивления стержней, расположенных в центре фильтра, диаметр феррита был уменьшен до величины 8,1 *мм*.

Коэффициент передачи по напряжению (под которым подразумевается отношение напряжений на концах снимающей и возбуждающей колебания катушек) для рассмотренных двухрезонаторных полосовых фильтров составляет $^1/_3$, а при замене постоянного магнита обмоткой с постоянным током в 16 *ма* снижается до $^1/_{10}$. Коэффициент передачи современных многозвенных механических полосовых фильтров приблизительно составляет $^1/_7$ по напряжению. Приведенные в качестве примеров многозвенные полосовые фильтры на пластинках из никеля и бронзы и на стальных стержнях вследствие недостаточной силы и неоптимальной формы постоянных магнитов имеют коэффициент передачи $^1/_{12}$.

Причиной снижения коэффициента передачи фильтра был еще довольно большой зазор между концевыми резонаторами и обмотками (снимающей и возбуждающей колебания). На рис. 22 показано, что щель, образованная витками плоской катушки, составляет 3 *мм*. Если каркасы катушек выполнить из более тонкого материала, то коэффициент передачи фильтра можно повысить.

Необходимо указать, что данные о скорости распространения звука в различных материалах, приведенные в табл. 1, не всегда оказываются точными. Например, скорость распространения звука в феррите зависит от его состава, а также от качества прессовки и температурного режима при его изготовлении. Для того чтобы резонансная частота концевых ферритовых стержней совпадала с резонансной частотой центральных резонаторов, нужно точно знать скорость распространения звука в материалах, из которых изготавливается фильтр. На рис. 10 показано, каким образом можно испытать ферритовый стержень, возбуждая в нем механические колебания. Зная ряд резонансных частот f_n, пропускаемых получившимся фильтром, и длину стержня l, по формуле (1) можно рассчитать скорость звука в феррите $U_{пр}$ и определить требуемые размеры магнитострикционных преобразователей. Таким путем было найдено, что скорость распространения звука в феррите с максимальной магнитострикцией равна $3{,}4 \cdot 10^5$ *см/сек*. Феррит с максимальной магнитной проницаемостью имеет скорость распространения звука $4{,}38 \cdot 10^5$ *см/сек*.

Кроме того, часто бывает неясен состав материала, который не имеет магнитострикционных свойств. Если материал имеет форму пластинки, то резонансные частоты и скорость звука в ней можно определить при помощи макета, схема которого изображена на рис. 14. Характеристическое

сопротивление возбуждающих никелевых проволок, приваренных к пластинке, должно быть много меньше характеристического сопротивления самой пластинки. Эквивалентная добротность проволок длиной $^3/_4\lambda$ составляет приблизительно 250.

Резонансные явления в проволоках можно прекратить, покрыв их тонким слоем пластелина. Если материал имеет форму стержня, то возбуждающие проволоки из никеля припаиваются к внешней поверхности стержня вблизи от торцов. Направление проволок должно совпадать с осью стержня. Схема макета такая же, как и для пластинки.

Изменение резонансной частоты механических фильтров в зависимости от окружающей температуры сравнительно невелико. От температуры изменяются не только линейные размеры резонаторов, но и скорость распространения колебаний в материале резонаторов. Во многих случаях температурные изменения линейных размеров и скорости звука действуют на резонансную частоту с противоположными знаками и частично компенсируют друг друга. Принято считать, что уход резонансной частоты механических фильтров составляет приблизительно $10^{-2}\%$ при изменении окружающей температуры на 1 °C.

ЛИТЕРАТУРА

А. А. Бронников, Электромеханические фильтры, „Радио", 1956, № 6.

Р. Бозорт, Ферромагнетизм (перевод с англ.), Изд. иностранной литературы, 1956.

А. К. Лосев, Расчет цепочечных полосовых фильтров, Труды РКВИАВУ имени К. Е. Ворошилова, вып. I, 1955.
